UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANEAMENTO

GUSTAVO BUENO ROMERO

**Dinâmica ecohidrológica de rios urbanos no contexto de gestão de riscos de
desastres**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos - SP

2016

GUSTAVO BUENO ROMERO

**Dinâmica ecohidrológica de rios urbanos no contexto de gestão de riscos de
desastres**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Mario Mendiando

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos - SP

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

R763d Romero, Gustavo
Dinâmica ecohidrológica de rios urbanos no contexto
de gestão de riscos de desastres / Gustavo Romero;
orientador Eduardo Mario Mendiando. São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2016.

1. Gestão de Riscos. 2. IP - Índice de Perigo. 3.
Rios Urbanos. 4. SWMM. 5. Ecohidrologia. 6. Modelagem
Matemática. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **GUSTAVO BUENO ROMERO.**

Título da dissertação: "Dinâmica ecohidrológica de rios urbanos no contexto de gestão de riscos de desastres".

Data da defesa: 06/05/2016

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Eduardo Mario Mendlondo**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **José Rodolfo Scarati Martins**
(Escola Politécnica/EP-USP)

Profa. Dra. **Melissa Cristina Perreira Graciosa**
(Universidade Federal do ABC/UFABC)

Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

À minha querida prima Lia, *in memoriam*.

À minha vó Leontina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Marcius Giorgetti, pelas orientações iniciais no PPG-SHS.

Ao Prof. Mario Menciondo, pela orientação neste trabalho, pela oportunidade de ampliar meu conhecimento, pelas valiosas discussões e *insights*, pela motivação enérgica e pela amizade. Muito obrigado.

Aos queridos integrantes do NIBH, Maria Clara, Narumi, Jairo, Danielle, Denise, Dulce, Guilherme, Diego, Jessica e Altair, pelo companherismo, ensinamentos e boas risadas. Em especial à Maria Clara, Danielle, Narumi e Diego, pela ajuda na coleta e análise dos dados de campo, modelagem e impressão final.

Aos meus amigos Ivan, Samuel, Antônio e Frederico, pelas conversas sobre Ciência e outras “coisas interessantes”.

Aos meus amigos Fausto e Ricardo, pelas reflexões densas.

Aos meus pais, pelo carinho.

À minha família, em especial à minha querida irmã, Nina, e à minha tia Rita, que mesmo de outro continente nunca deixaram de me acompanhar e motivar.

À minha incrível companheira, Michelle, pela ajuda incondicional e suporte. Sem sua ajuda nada disso seria possível. Obrigado!

Aos funcionários do LABSAN – SHS, Júlio, Bianca, Aparecida, Paulo e Sabrina, pelos ensinamentos na bancada, paciência e ajuda nas análises em laboratório.

Às funcionárias do departamento Sá, Rose e Priscila.

A CAPES, pela bolsa concedida.

A FINEP, que por meio do projeto MAPLU - FINEP 01.10.0701.00 pagou pelos insumos de laboratório e pelas coletas em campo.

RESUMO

ROMERO, G. B. **Dinâmica ecohidrológica de rios urbanos no contexto de gestão de riscos de desastres**. 2016. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

A expansão do tecido urbano e o adensamento das cidades têm um impacto negativo sobre os recursos hídricos, tanto na quantidade quanto na qualidade das águas no ambiente, pois aumenta as cargas de poluentes no meio e altera o ciclo hidrológico natural, criando riscos à população.

É possível reduzir tais riscos através do diagnóstico, planejamento e gestão adequada das áreas de risco para a proteção civil e das comunidades.

A abordagem ecohidrológica, que considera a relação funcional entre hidrologia, sistemas aquáticos e sua biota na escala de bacia hidrográfica, incorporando aspectos quantitativos e qualitativos da água em uma visão de interdependência entre Ecologia e Hidrologia, permite o diagnóstico, planejamento e manejo adequado dos cursos hídricos em benefício tanto dos humanos quanto dos demais seres vivos.

Este trabalho busca investigar a dinâmica ecohidrológica no espaço e no tempo da Bacia do Rio Monjolinho, localizada no Município de São Carlos (SP), no contexto de gestão de riscos de desastres hidrológicos.

Os processos quantitativos são investigados por meio de simulações com o SWMM (Storm Water Management Model) e os dados de simulação são utilizados, por vez, na determinação do IP (Índice de Perigo) de pontos estratégicos da bacia hidrográfica e também das áreas com maior risco de inundação.

Com relação à qualidade, onze variáveis clássicas de qualidade d'água são determinadas experimentalmente em 15 pontos da bacia a fim de caracterizar a dinâmica das cargas de poluentes, permitindo desta maneira a avaliação do risco biológico na bacia.

Os resultados quali-quantitativos mostram que os vales dos rios oferecem riscos tanto devido às inundações quanto devido ao alto risco de contaminação.

Palavras-chave: Gestão de Riscos, IP - Índice de Perigo, Rios Urbanos, SWMM, Ecohidrologia, Modelagem.

ABSTRACT

GUSTAVO, G. B. **Ecohydrological dynamics of urban rivers in the context of disaster risk management**. 2016. M.Sc. Dissertation. São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, Brazil, 2016.

The urban tissue expansion and the urban area densification have a negative impact on water resources, in terms of quality and quantity of available water, since it increases the pollutant load at the same time it changes the natural hydrological cycle, exposing population to risk.

It is possible to reduce the risks by means of assessment, planning and correct management of risk areas in order to protect the communities. The ecohydrology, which takes into account the functional relationship between hydrology, aquatic systems and biota in watershed scale, considering qualitative aspects and their interdependencies, enable us to assess, plan and manage risks in an advantageous way for humans and living beings as well.

This work investigates the ecohydrology dynamics in space and time of Rio Monjolinho basin, located within the municipality of São Carlos (SP), Brazil, in the context of disaster risk management.

The quantitative aspects are investigated using the SWMM (Storm Water Management Model) simulation model, and the simulation data generated are used to calculate the Risk Index (RI) and to map the flooding risk areas in the basin.

Eleven classic water quality variables are experimentally determined to assess the pollutant load dynamics and its distribution in the sub-basins, enabling us to assess the biologic risks.

The results show that some areas in the catchment are not just flood risk areas but also areas of high biological risk of contamination.

Keywords: Risk Management, Risk Index (RI), Urban Rivers, SWMM, Ecohydrology, Modeling.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros de caracterização das sub-bacias no modelo SWMM.	26
Tabela 2: Valores de CN para escoamento em áreas urbanas.....	27
Tabela 3: Parâmetros de caracterização dos trechos no modelo SWMM.	28
Tabela 4: Parâmetros de saída nos trechos do modelo SWMM.	28
Tabela 5: Primeira coleta: concentrações dos parâmetros de qualidade da água	33
Tabela 6: Segunda coleta: concentrações dos parâmetros de qualidade da água ...	34
Tabela 7: Terceira coleta: concentrações dos parâmetros de qualidade da água	34
Tabela 8: Primeira coleta: vazão e velocidade média	35
Tabela 9: Segunda coleta: vazão e velocidade média	36
Tabela 10: Terceira coleta: vazão e velocidade média	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Área do estudo: Bacia do Rio Monjolinho, São Carlos (SP), Brasil.....	24
Figura 2: Modelo SWMM da Bacia do Rio Monjolinho (BRM)	25
Figura 3: Grafo direcional do modelo SWMM.....	31
Figura 4: Vazões estimadas nas três campanhas.....	38
Figura 5: Primeira coleta: carga específica de Amoniacal.....	40
Figura 6: Segunda coleta: carga específica de Amoniacal.....	40
Figura 7: Terceira coleta: carga específica de Amoniacal	42
Figura 8: Primeira coleta: carga específica de Fósforo Total	44
Figura 9: Segunda coleta: carga específica de Fósforo Total	45
Figura 10: Terceira coleta: carga específica de Fósforo Total.....	46
Figura 11: Primeira coleta: carga específica para a DBO	47
Figura 12: Segunda coleta: carga específica para a DBO	48
Figura 13: Terceira coleta: carga específica para a DBO.....	49
Figura 14: Primeira coleta: carga específica para a <i>E. coli</i>	50
Figura 15: Segunda coleta: carga específica para a <i>E. coli</i>	51
Figura 16: Terceira coleta: carga específica para a <i>E. coli</i>	52
Figura 17: Tempo de Concentração (Tc) obtidos por Kirpich	54
Figura 18: Tempo de Concentração (Tc) dos trechos ordenados	54
Figura 19: Chuva de projeto com Tr de 2 anos. Duração de 130 minutos	56
Figura 20: Vazão Relativa. Precipitação: Tr de 2 anos	57
Figura 21: Índice de Perigo (IP). Precipitação: Tr de 2 anos	58
Figura 22: Chuva de projeto com Tr de 50 anos. Duração de 130 minutos.	59
Figura 23: Vazão Relativa. Precipitação: Tr de 50 anos.	60
Figura 24: Índice de Perigo (IP). Precipitação: Tr de 50 anos.	61

ACRÔNIMOS

BRM – Bacia do Rio Monjolinho

CF – Coliformes Fecais

CT – Coliformes Totais

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EPA – Environmental Policy Integrated Climate Model

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

FT – Fósforo Total

IP – Índice de Perigo

DEM – Modelo Digital de Elevação

NMP – Número Mais Provável

NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl

OD – Oxigênio Dissolvido

PMSC – Prefeitura Municipal de São Carlos

pH – Potencial Hidrogeniônico

SAAE – Sistema Autônomo de Água e Esgoto

SCS – Soil Conservation Service

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SS – Sólidos Suspensos

ST – Sólidos Totais

STF – Sólidos Totais Fixos

STORM – Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model

STV – Sólidos Totais Voláteis

SWMM – Storm Water Management Model

SWRB – Soil Water Retention Barriers

T_c – Tempo de Concentração da Bacia

T_r – Tempo de Retorno

TOC – Carbono Orgânico Total

UFSCAR – Universidade Federal de São Carlos

UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivos Específicos.....	15
2.2	Síntese Metodológica.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Abordagem numérica baseada em modelos hidrológicos.....	19
3.2	Índice de Perigo – IP	20
3.3	Visualização de Dados.....	22
4	MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1	Área de estudo.....	23
4.2	SWMM	26
4.3	Aspectos Quantitativos.....	28
4.4	Índice de Perigo – IP	29
4.5	Aspectos Qualitativos.....	30
4.6	Visualização de dados	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1	Qualidade.....	33
5.2	Quantitativo.....	52
6	CONCLUSÕES.....	62
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
	ANEXOS	71
	Anexo A: Script Principal de Execução.....	71
	Anexo B: Grafo Direcional para obtenção do Tempo de Concentração.....	77
	Anexo C: Extração de Dados Binários gerados pelo SWMM.....	85
	Anexo D: Algoritmo de Blocos Alternados	92
	Anexo E: Patches para a Compilação Correta do engine SWMM 5.1.010	98

1 INTRODUÇÃO

A expansão do tecido urbano e o adensamento das cidades são processos que, de acordo com o período histórico, possuem diferentes intensidades, pois são modulados por ciclos de euforia e depressão econômica, pelo grau de desenvolvimento tecnológico, pela ocorrência de desastres naturais, por políticas públicas, etc., mas que, em última instância, são perpétuos, isto é, não possuem um *setpoint*, um ponto de equilíbrio estável final ou um ponto de parada (RALPH & ANDERSON, 2001; ANGEL et al., 2005).

Tais processos têm um impacto negativo sobre os recursos hídricos, tanto na quantidade quanto na qualidade das águas no ambiente aonde se desenvolvem, gerando, em última instância, riscos à população. A percepção deste fenômeno é mais evidente para a qualidade da água (notem-se os exemplos marcantes do Rio Pinheiros e do Rio Tietê quando atravessam a cidade de São Paulo), mas menos perceptível no caso de alteração na disponibilidade de água (MONSTADT, 2009), embora seja evidente, do ponto de vista lógico, que o aumento do número de habitantes implique diretamente no aumento da demanda de água potável e, conseqüentemente, numa menor disponibilidade deste recurso, por exemplo.

Em todo caso, tais processos aumentam as cargas de poluentes no meio ambiente, detectáveis tanto em ambiente aquático quanto no ar, e também alteram o ciclo hidrológico natural (TUCCI, 2003).

Na cidade de São Carlos (SP), diversos estudos (SÉ, 1992; BARRETO, 1999; PELAEZ-RODRIQUEZ, 2001; VIANA, 2005; FRACÁCIO, 2006; DORNFELD, 2006; ZAFFANI, 2012) apontam para a existência de um gradiente decrescente de qualidade da água nos principais rios que cortam a cidade, quando estes, vindos de suas nascentes, menos impactadas, descem através das áreas urbanizadas.

No conjunto, estes estudos indicam a necessidade de se compreender até que ponto as alterações provocadas pela expansão do tecido urbano afetam a qualidade da água nos corpos d'água que interagem com o sistema urbano e, também, de uma caracterização da dinâmica de poluentes nos trechos destes corpos, para que seja possível diagnosticar as áreas específicas que contribuem para o aumento das áreas de risco, se o risco de inundação ou o risco de contaminação biológica, relacionadas à carga de poluentes nos corpos d'água.

Desta forma, é possível minimizar os impactos sobre as comunidades por meio do diagnóstico, planejamento e manejo adequado de áreas urbanas.

A abordagem ecohidrológica considera a relação funcional entre hidrologia, sistemas aquáticos e sua biota na escala de bacia hidrográfica, incorporando aspectos quantitativos e qualitativos da água em uma visão de interdependência entre Ecologia e Hidrologia, permitindo o diagnóstico, planejamento e o manejo adequado dos cursos d'água em benefício de todos os seres vivos.

Este trabalho busca, por meio da abordagem ecohidrológica, investigar a dinâmica no espaço (área da bacia) e no tempo (eventos de precipitações com diferentes Tempos de Retorno – T_r) da Bacia do Rio Monjolinho, que localiza-se no Município de São Carlos (SP) e aonde ocorre a maior concentração urbana. Os modelos matemáticos utilizados para a descrição dos processos na bacia serão os implementados no software SWMM (*Storm Water Management Model*) e, devido à quantidade e à complexidade dos dados gerados pelas simulações numéricas, este trabalho também busca a obtenção de uma formulação gráfica para a visualização concisa destes dados.

2 OBJETIVOS

Integrar análises experimentais, de modelagem numérica e a visualização da dinâmica espaço-temporal da ecohidrologia fluvial em bacias urbanas sob o contexto de gestão de riscos de desastres.

2.1 Objetivos Específicos

- Analisar experimentalmente a distribuição espacial das cargas poluentes da drenagem urbana a partir da abordagem de ecohidrológica;
- Modelar e simular numericamente a dinâmica quantitativa do escoamento fluvial em bacias urbanas;
- Apresentar novas formas de visualização da dinâmica espaço-temporal da ecohidrologia fluvial sob a ótica da gestão de riscos para proteção civil e comunitária.

2.2 Síntese Metodológica

A abordagem ecohidrológica para o gerenciamento sustentável da água requer o estudo das inter-relações funcionais entre a hidrologia e a biota na escala da bacia hidrográfica (ZALEWSKI, 2000). Como a carga de poluentes afeta diretamente a biota, o monitoramento da qualidade da água faz-se necessário, sendo um dos objetivos deste trabalho.

O lançamento e o carreamento de poluentes nos corpos d'água possui uma dinâmica complexa, ligada às múltiplas atividades humanas desenvolvidas na bacia, tanto em área urbana quanto na área rural. Sendo assim, o primeiro passo para se atingir os objetivos específicos propostos é o monitoramento das vazões e das concentrações de poluentes nos pontos experimentais analisados neste trabalho (os pontos serão descritos em detalhe na parte de “Material e Métodos”, adiante).

Além disso, para o caso específico deste estudo, os dados experimentais qualitativos obtidos durante as campanhas serão complementados com os dados experimentais de duas dissertações de Mestrado (PEHOVAZ, 2010; ZAFFANI,

2012), fornecendo um padrão espacial da carga de poluentes para as áreas das sub-bacias.

Nesse sentido, uma informação fundamental extraída ao relacionarmos os dados experimentais de qualidade (concentrações) com os dados de quantidade experimentais (vazões no momento das coletas) é a carga específica de poluente para uma dada seção de rio e, assim, a carga específica, L , de um dado poluente por área de drenagem (sub-bacia) por unidade de tempo, em $\text{kg/m}^2 \text{ ano}$.

A carga específica por área de drenagem ($\text{kg/m}^2 \text{ ano}$) é determinada multiplicando-se a concentração de um poluente (kg/m^3) pela vazão $Q(t)$ (m^3/s), obtendo-se o quanto de poluente, em massa, atravessa teoricamente uma dada seção transversal do rio. Ao dividirmos a taxa da massa de poluente pela área de drenagem do ponto investigado infere-se o quanto está sendo gerado de carga poluidora (difusa + pontual) pela sub-bacia relativa ao ponto. Então é possível construir um gráfico de L ($\text{kg/m}^2 \text{ ano}$) x Área (km^2), a carga específica por área por unidade de tempo, que permite a análise das sub-bacias onde há maior produção de poluentes (num dado intervalo de tempo ou período sazonal) e, conseqüentemente, a identificação das áreas que mais contribuem para a degradação da qualidade dos rios.

Se for possível encontrar tal padrão sazonal, então seria possível determinar uma curva-chave dos parâmetros qualitativos e incluí-los em um modelo da bacia, desde que este permita a inserção de parâmetros para equações que governem a carga de poluentes nos pontos de simulação, o que, porém, não será feito neste trabalho, sendo deixado para um trabalho posterior.

Com relação ao aspecto quantitativo, o modelo SWMM, uma vez calibrado para a bacia, permite explorar os aspectos quantitativos dos corpos d'água na BRM, tais como alterações no regime hidrológico de acordo com diferentes usos e formas de ocupação do solo, mas, especialmente, investigar a resposta dos corpos hídricos na BRM frente a diferentes precipitações, ou seja, com diferentes Tempos de Retorno, T_r , permitindo a identificação de pontos de risco de inundação.

Com relação aos dados gerados pelo modelo SWMM (simulação), a grande quantidade de pontos modelados e o tamanho das séries temporais qualitativas (vazões, níveis de lâmina d'água, velocidades e IP) gerados num único ciclo de simulação exige a visualização dessas séries de forma concisa em cada região da bacia. Neste caso, tabelas e gráficos clássicos de apenas dois eixos não

são ferramentas apropriadas. Logo, a parte final do trabalho consiste em utilizar uma formulação visual (gráfica) conhecida como “gráficos de lajotas” (do Inglês, *tiles*) para a representação das variáveis e dos Índices de Perigo (IP) obtidos nas simulações e que, além disso, apresente informações topológicas da rede de rios da bacia hidrográfica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Abordagem Ecohidrológica

O desenvolvimento econômico no século XX exigiu o conhecimento quantitativo dos recursos hídricos para o melhor aproveitamento destes. Desta forma, uma das tarefas do engenheiro passou a ser a quantificação dos processos hidrológicos necessários a grandes projetos, como obras de regularização, previsão de enchentes e avaliação do impacto dos despejos sobre os rios provenientes de concentrações urbanas (MENDIONDO & TUCCI, 1997).

No entanto, as preocupações ambientais suscitadas pela sociedade na década de 70 criaram uma nova demanda à Ciência Hidrológica. Esta demanda encerra questões sobre os impactos gerados pelo uso do solo rural e urbano, sobre a qualidade e quantidade da água dos rios, sobre a existência de alterações climáticas de origem antrópica e, conseqüentemente, sobre as ações necessárias para a mitigação ou reversão destes impactos. Assim, por conta destes novos anseios sociais, a água passa a ser investigada não só apenas em termos de sua quantidade, mas também em termos de qualidade frente aos múltiplos usos desta para a sociedade moderna, buscando-se uma integração com a Ecologia.

A ecohidrologia busca entender a relação funcional entre Hidrologia, sistemas aquáticos e sua biota na escala de bacia hidrográfica, investigando processos do ecossistema para encontrar metas para a gestão sustentável da água doce (UNESCO, 2007). Janauer (2000) define a ecohidrologia como o estudo da interdependência entre ecologia e hidrologia com objetivo de mudar os cursos d'água em benefício de todos os seres vivos. Nesta definição a ecohidrologia integra à ecologia abordagens hidrológicas (quali-quantitativas), considerando indispensável as informações dos processos biológicos em estudos de hidrologia, o que também a caracteriza como uma ciência que busca o conhecimento para que possamos compreender a influência das atividades humanas sobre os recursos hídricos (NUTTLE, 2002).

Segundo Zalewski (2002), o ambiente aquático, na escala da bacia hidrográfica, é uma função de fatores climáticos, geomorfológicos e da evolução biológica. Moraes (2009) afirma que a ecohidrologia vem sendo utilizada como uma

ferramenta útil para o uso sustentável dos recursos hídricos em áreas urbanas, pois, em ecossistemas de água doce, a qualidade da água depende de fatores e processos bióticos, abióticos e antrópicos, favorecendo o uso desta abordagem para a gestão dos recursos hídricos e também de riscos.

Almeida-Neto, op. cit., afirma que os princípios envolvidos na abordagem ecohidrológica já foram discutidos por diversos autores, por exemplo, sobre continuidade (VANNOTE et al., 1980, KAREIVA & WENERGREN, 1995; DALE et al., 2000), diversidade (NEIFF, 1990; HULSE et al., 2000; WARD & TOCKNER, 2001; BUNN & ARTHINGTON, 2002), similaridade de habitats nas interfaces entre rio e várzea (THOMAZ et al., 2007), vulnerabilidade (DER VEEN, LOGTMEIJER, 2005; BERKES, 2007), resiliência e estabilidade (HOLLING, 1973; HOLLING & GUNDERSON, 2002).

3.1 Abordagem numérica baseada em modelos hidrológicos

Modelos hidrológicos da drenagem urbana são ferramentas importantes para o teste de hipóteses e tomada de decisão.

O modelo *Storm Water Management Model* (SWMM) é um modelo dinâmico que permite a simulação de chuva-vazão. Neste, o componente de escoamento trabalha com conjuntos de sub-bacias que recebem a precipitação e geram o escoamento. Ainda, neste componente é possível definir parâmetros para a simulação da dinâmica de cargas poluentes. O modelo pode transportar o escoamento por tubulações, canais, unidades de tratamento, bombas, entre outros (ROSSMAN, 2014).

Segundo Collodel (2009), o modelo permite a escolha do nível de detalhe desejado (micro ou macro-drenagem) e, a partir da inserção de dados de entrada, simula os hidrogramas resultantes. Como resultado, o modelo determina a quantidade da água de escoamento, vazão e profundidade do fluxo, velocidade em tubulação ou canal e concentração de poluentes, podendo desta forma ser aplicado a sistemas urbanos para análise de fontes de poluentes.

O SWMM implementa diversos modelos hidrológicos que são úteis para a análise do escoamento em áreas urbanas, permitindo a descrição integrada de diversos fenômenos, como a interceptação da precipitação, infiltração, percolação da

água nas camadas do solo, captação e retenção da chuva-vazão, entre outros. A variabilidade espacial destes processos é feita com a subdivisão da bacia de estudo em unidades menores, sub-bacias. O modelo conta também com um flexível conjunto de modelagem hidráulica para rotear o escoamento e influxos externos através de redes de drenagem, canais, unidades de armazenamento e tratamento e outras estruturas.

O software tem a capacidade de considerar tamanhos ilimitados de redes, de diferentes condutos, sejam abertos ou fechados, naturais ou não, conseguir modelar elementos como bombas, unidades de tratamento e armazenamento, barragens, divisores de fluxo, entre outros. Além disso, aliado a modelos de geração e transporte de fluxos, permite estimar a produção de cargas poluentes associadas ao escoamento e também a análise do acúmulo de poluentes em tempo seco, da lavagem de poluentes em eventos específicos, da redução da concentração de certos constituintes devido ao tratamento, etc (ROSSMAN, 2014).

De acordo com Pehovaz (2010), os resultados das simulações apresentados pelo SWMM na forma de hidrogramas e polutogramas fornecem subsídios para a tomada de decisões operacionais com relação a aspectos quali-quantitativos e, por consequência, fornece subsídios que auxiliam na análise ecohidrológica de bacias hidrográfica urbanas. Sendo assim, o SWMM foi o software escolhido para as simulações numéricas.

3.2 Índice de Perigo – IP

Segundo Shidawara (1999), o mapeamento de áreas susceptíveis a inundação é uma das etapas mais importantes dentre todas as medidas existentes.

O Decreto Federal n. 7.257/2010, que dispõe sobre o Sistema Nacional de Defesa Civil – SINDEC, considera as ações de prevenção de desastres naturais por meio da identificação, mapeamento e monitoramento de riscos, perigos e vulnerabilidades locais (BRASIL, Decreto Federal n. 7.257/2010). Tal Decreto, ainda, recomenda a identificação e inclusão das áreas de risco no Plano Diretor dos municípios.

Desta forma, é clara a necessidade de criação de mapas de perigos relacionados às bacias hidrográficas, sobretudo nas bacias urbanizadas, como é o

caso da Bacia do Rio Monjolinho, a fim de auxiliar em medidas não-estruturais capazes de diminuir o impacto dos desastres naturais, como as enchentes.

Uma das características que tornam o emprego de medidas não-estruturais atrativo é o seu baixo custo de implementação quando comparado com medidas estruturais. Nesse sentido e com relação a inundações, o Índice de Perigo (IP) é uma das ferramentas que pode ser utilizada para o mapeamento de riscos em uma bacia hidrográfica (Osti et al., 2008).

Aqui, em conformidade com Goerl et al. (2012), o risco é entendido como uma função do perigo e da vulnerabilidade. Sendo assim, o IP é tratado como um pré-requisito para a determinação do risco ligado às inundações e, portanto, também um pré-requisito para elaboração de mapas de risco.

O IP é um índice que avalia a vulnerabilidade das pessoas expostas e parcialmente submersas a um escoamento superficial, determinando um limite teórico de estabilidade que, quando ultrapassado, informa que a pessoa será levada pela correnteza.

O emprego de um Índice de Perigo definido como $IP(t) = h(t) \times v(t)$ foi sugerido por Stephenson (Stephenson, 2002) e será utilizado nesse estudo. Uma discussão mais ampla e aprofundada sobre o IP definido desta forma e outras possibilidades pode ser encontrada em Rotava (2014).

Nessa definição, $h(t)$ é variável no tempo referente à altura da lâmina d'água, enquanto $v(t)$ indica a velocidade média numa dada seção da lâmina d'água, de forma que ao IP sempre se encontra associado uma coordenada no espaço onde as variáveis $h(t)$ e $v(t)$ podem ser determinadas.

De acordo com Jonkman e Penning-Rowse (Jonkman & Penning-Rowse, 2008), o Índice de Perigo (IP) definido como $IP = hv$ tem sido empregado por diversos autores. Além disso, segundo Stephenson (Stephenson, 2002), foi utilizado também por diversas agências na elaboração de mapas e diagramas de risco.

Abt (Abt et al., 1989) realizou um dos primeiros estudos experimentais para a determinação de valores críticos para o produto hv , valores que, se ultrapassados, implicam na pessoa ser arrastada pela correnteza.

Ambos os valores podem ser obtidos diretamente a partir das simulações no modelo SWMM, sendo possível investigar o IP com relação a diferentes perfis de precipitações em pontos estratégicos da bacia.

Nesse estudo, o IP foi investigado para quatro tipos de precipitação: com Tempo de Retorno (TR) de 2, 5, 10 e 50 anos. Os valores h e v são referentes ao escoamento superficial gerado por algum desses quatro tipos de precipitação na bacia estudada, contudo podem ser obtidos de forma similar em qualquer outra bacia.

3.3 Visualização de Dados

Visualização é um termo amplo. Já foi definido como “um método para ver o invisível” (DEFANTI et al., 1989). Card (1999) sugeriu que a visualização é “o uso de representações criadas por computador para se representar um conjunto de dados abstratos de tal forma que seja possível uma amplificação do conhecimento”, destacando-o como um método com fundamentos científicos para a visualização de dados de origem física.

Chen (2002) afirma que “a visualização pode ser definida, no sentido mais amplo, como um processo auxiliado por computador que tem por objetivo gerar *insights* sobre um fenômeno abstrato por meio da transformação de dados em formas visuais no espaço. A ideia é otimizar o uso da nossa percepção e do nosso pensamento visual para lidar com fenômenos que não podem ser prontamente representados por formas visuais no espaço”.

Mais recentemente, após um desenvolvimento considerável deste campo de investigação a partir do final dos anos 90, Ward et al. (2010) define a visualização de dados como “a comunicação de informações por meio de representações gráficas”, enfatizando que a visualização não é o mesmo que gráficos gerados por computador, pois o que é crucial é a forma como a conexão com os dados é feita”.

Uma forma de visualizar os dados quali-quantitativos de uma bacia hidrográfica é por meio de um gráfico de lajetas, onde um conjunto de valores de uma série temporal discreta é atribuído a uma cor. Geralmente cores mais intensas representam valores maiores.

Geralmente numa simulação numérica de um modelo hidrológico existem muitos nós de controle, tendo cada um uma série associada para um determinado parâmetro.

O gráfico de lajetas permite a representação de um grande número de séries de forma concisa que quando são ordenadas segundo alguma topologia (área de drenagem, tempo de concentração, etc) podem servir como uma impressão digital (fingerprint) da bacia hidrográfica.

Neste estudo, portanto, o gráfico *tiles* será utilizado para a apresentação dos dados calculados a partir das séries temporais obtidas do modelo SWMM, particularmente para os dados de vazão (vazão relativa) e IP.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área de estudo, a Bacia do Rio Monjolinho (BRM), localiza-se no Município de São Carlos (SP), no interior do Estado de São Paulo, a 250 km da Capital.

Segundo dados estimados a partir do Censo Demográfico do IBGE (2010), o Município tem uma população de aproximadamente 241.389 habitantes e uma área de 1.136,907 km². Desta área, apenas 6% corresponde à área urbanizada (PMSC), sendo que a BRM é a bacia onde ocorre a maior densidade populacional (195 hab/km²) e, portanto, corresponde à área na qual os problemas decorrentes da intensa urbanização são mais notáveis e, conseqüentemente, onde a demanda pela gestão apropriada de riscos de desastres é maior.

Por se tratar da bacia mais urbanizada deste Município, muitos estudos já foram realizados nesta área, o que contribuiu para a existência de uma rica base de dados e registros históricos importantes para a comparação com o estado atual da bacia avaliado neste estudo.

Os dois biomas predominantes originalmente no Município são a Mata Atlântica e o Cerrado, restritos, atualmente, a pequenos fragmentos no meio de lavouras de cana-de-açúcar. O relevo característico é o Planalto Sedimentar. Quanto aos solos da cidade de São Carlos, estes são caracterizados por alta permeabilidade (POLIS, 2002), sendo oito tipos de solo identificados, porém os predominantes são o latossolo-vermelho-amarelo e a área quartzosa profunda.

O mapa da área de estudo é apresentado na Figura 1. Os 15 pontos na área de estudo onde a coleta de água (Análise Qualitativa) e as medições de vazão e de

níveis limnimétrico (Análise Quantitativa) foram feitas na Bacia do Rio Monjolinho (BRM), São Carlos (SP), Brasil, delineada em linha amarela. A área total é de 78 km². Os corpos d'água que foram objeto do estudo estão destacados em azul. Nessa figura, os pontos identificados como 1, 2, 3, 8 e 14 pertencem ao Rio Monjolinho e estão, nessa sequência, dispostos em sentido de montante à jusante. Assim, o ponto 1 é o mais próximo da nascente, enquanto o ponto 14 é o ponto mais distante. O ponto 14 também corresponde ao exutório da bacia hidrográfica em questão.

Figura 1: Área do estudo: Bacia do Rio Monjolinho, São Carlos (SP), Brasil

Quanto aos demais pontos, localizados nos tributários, eles foram escolhidos de forma que ao menos dois pontos de controle (para coleta e determinação de vazão) existam num afluente. Dessa maneira, para os tributários escolhidos, existe ao

menos um ponto mais perto da nascente e outro ponto um pouco antes do tributário se juntar com o Rio Monjolinho. Com relação a um mesmo tributário, o ponto com numeração menor corresponde ao ponto mais próximo da nascente, e as numerações subsequentes, incrementais, correspondem a pontos mais próximos da junção do tributário com o Rio Monjolinho.

No mapa da Figura 1, os pontos 4 e 5 estão localizados no Córrego Santa Maria do Leme; os pontos 6 e 7, no Córrego do Tijuco Preto; os pontos 9 e 10, no Córrego do Mineirinho; e os pontos Mt. G, 11, 12 e 13, no Córrego do Gregório. No caso do Córrego do Gregório, deve-se ressaltar que a identificação dos pontos foge à lógica empregada nos outros tributários para o ponto Mt. G. O motivo é que este ponto foi adicionado após a identificação dos outros pontos e, portanto, uma alteração neste para conformidade mencionada iria acarretar na alteração indesejada da identificação dos demais pontos.

Com relação às Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHIs do Estado de São Paulo), a BRM faz parte da UGRHI 13, Tietê-Jacaré, as quais pertencem, além da BRM, também as sub-bacias do Feijão e do Jacaré-Guaçu. A área total da BRM é de 78 km².

Figura 2: Modelo SWMM da Bacia do Rio Monjolinho (BRM)

A discretização da BRM em sub-bacias utilizada neste estudo foi a proposta por Souza (2008) e a utilizada por Pehovaz (2010) e Zaffani (2012). Tal subdivisão é interessante para capturar as nuances no uso do solo que ocorrem na bacia e os impactos destes usos nos corpos d'água, tanto em aspectos quantitativos, permitindo uma análise hidrológica mais detalhada, quanto em relação aos aspectos qualitativos, permitindo um estudo mais específico das áreas que impactam a qualidade dos rios na bacia. Assim, tal discretização divide a BRM em 57 unidades ou sub-bacias.

Para o modelagem da BRM no SWMM, são estas 57 unidades (sub-bacias) que são consideradas na construção do modelo de simulação (Figura 2). O modelo possui 182 nós de controle.

4.2 SWMM

O modelo SWMM foi criado a partir do Modelo Digital de Elevação (DEM) da área de estudo obtido via satélite, com resolução de 30 metros (NASA, 2001). As sub-bacias foram então definidas de acordo com os 15 pontos de coleta experimental, entre os quais se encontram os exutórios destas.

De acordo com o que foi proposto por Souza (2008), as sub-bacias possuem características determinadas pelos parâmetros descritos na Tabela 1, ajustados no modelo para as rodadas de simulação.

Tabela 1: Parâmetros de caracterização das sub-bacias no modelo SWMM.

Parâmetro	Unidade
Área	ha
Largura	m
Declividade	%
Áreas impermeáveis	%
Coeficiente de rugosidade de Manning para áreas impermeáveis	$s/(m^{1/3})$
Coeficiente de rugosidade de Manning para áreas permeáveis	$s/(m^{1/3})$
Áreas impermeáveis sem armazenamento em depressões	%
Curve Number (CN) do modelo de infiltração	-

Os parâmetros Área, Largura e Declividade foram extraídos do DEM, enquanto o valor CN para a modelagem da infiltração foi o estimado segundo a tabela de valores de Cronshey (1986), reproduzidos na Tabela 2.

Tabela 2: Valores de CN para escoamento em áreas urbanas.

Tipo de cobertura e condição hidrológica	% de área impermeável	CN para grupos de solo			
		A	B	C	D
Áreas urbanas completamente desenvolvidas					
Espaços abertos (parques, campos de golfe, cemitérios, etc)					
Condições pobres (cobertura vegetal < 50%)		68	79	86	89
Condições medianas (cobertura 50% a 75%)		49	69	79	84
Condições boas (cobertura > 75%)		39	61	74	80
Áreas impermeáveis					
Estacionamentos pavimentados, rodovias, etc		98	98	98	98
Valetas		83	89	92	93
Terreno com cascalho		76	85	89	91
Distritos urbanos					
Distritos comerciais	85	89	92	94	95
Distritos industriais	72	81	88	91	93
Distritos residenciais por lote médio					
1/8 acre	65	77	85	90	92
1/4 acre	48	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1 acre	20	51	68	79	84
2 acres	12	46	65	77	82

Uma parte fundamental do modelo SWMM são os trechos, representações dos condutos abertos no modelo, que ligam os nós de controle dos percursos. Eles são importantes porque é a partir dos valores de saída dos parâmetros associados a eles e gerados durante a simulação que o Índice de Perigo (IP) e os valores hidrológicos são obtidos. Os parâmetros de entrada para os trechos de simulação estão listados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de caracterização dos trechos no modelo SWMM.

Parâmetro	Unidade
Profundidade máxima	m
Comprimento (de nó a nó)	m
Coefficiente de Manning para rugosidade no trecho	$s/(m^{1/3})$
Vazão inicial (valor de base, determinado em campo)	m^3/s

Os parâmetros e saída utilizados, presentes na Tabela 4, são Vazão, Velocidade e Altura da Lâmina d'água no trecho, determinados a cada instante da simulação.

Tabela 4: Parâmetros de saída nos trechos do modelo SWMM.

Parâmetro	Unidade
Velocidade	m/s
Altura da Lâmina d'água	m
Vazão	m^3/s

Os valores de saída para os parâmetros na Tabela 4, gerados após a simulação, são então extraídos do arquivo binário criado pelo SWMM utilizando-se uma ferramenta própria, escrita em linguagem Python, e depois são importados para dentro do *software* R, onde os cálculos de Índice de Perigo, determinação das vazões críticas e geração de gráficos é feita. O script R responsável por isso encontra-se no Anexo C.

O modelo completo da Bacia do Rio Monjolinho utilizado neste estudo está no CD-ROM que acompanha esta dissertação.

4.3 Aspectos Quantitativos

Uma vez construído o modelo SWMM da Bacia do Rio Monjolinho, é possível simular as vazões nos corpos d'água para diferentes pulsos de precipitação.

Para a comparação dos resultados, foram escolhidos apenas os resultados referentes a extremos, isto é, para precipitações com Tempo de Retorno (Tr) de 2 e 50 anos. Os resultados intermediários (para precipitações com Tr de 5 e 10 anos) foram gerados também mas estão presentes apenas em arquivos, mas não foram apresentados porque para a discussão da metodologia proposta as chuvas de projeto com Tr de 2 e 50 anos são suficientes.

As séries de precipitação para a simulação chuva-vazão no SWMM, foram geradas por meio do Método dos Blocos Alternados (Tucci, 2001; Akan, 1993), implementado em R, cujos detalhes estão no Anexo D. A curva IDF característica para a bacia empregada no cálculo foi a desenvolvida por Barbassa (BARBASSA, 1991). A precipitação foi considerada uniforme em toda a área da bacia.

As séries gerais são formatadas de acordo com as especificações de entrada do SWMM e então pode ser incluídas nas rodadas de simulação. Neste trabalho considerou-se uma precipitação uniforme por toda bacia hidrográfica.

Quanto ao tempo de duração das séries de precipitação, o utilizado foi o tempo de duração crítico, ou seja, o tempo de concentração de toda a bacia.

4.4 Índice de Perigo – IP

Neste trabalho, utiliza-se a diferença conceitual entre índice e indicador, em concordância com o que é discutido por Siche e colaboradores (SICHE et al., 2007).

O Índice de Perigo (IP) é definido como o produto da velocidade de escoamento pela profundidade da lâmina d'água num dado instante de tempo, assim, temos: $IP(t)=v(t)h(t)$. Tal índice tem por objetivo a quantificação da vulnerabilidade de pessoas expostas à corrente de água. Se a corrente é consequência de uma inundação, então o IP refere-se a vulnerabilidade de uma pessoa durante uma inundação num dado ponto para um dado evento de precipitação. Em outras palavras, dado que uma inundação ocorra, o IP é uma medida da possibilidade de uma pessoa ser levada à instabilidade e carregada pela corrente.

Shand, Cox e Blacka (2011) comparam diferentes trabalhos na área de avaliação de perigo de pessoas em inundações e propõem critérios de segurança baseados em medidas empíricas e estudos teóricos. Com base em dados

experimentais, adotam IP como o produto h_v e definem faixas de IP para indivíduos adultos. Assim, consideram o IP de 0 – 0,4 como risco baixo, 0,6 – 0,8 como risco moderado, 0,8 – 1,2 como risco alto e valores maiores que 1,2 como risco extremamente alto. No presente trabalho, essas faixas são as adotadas para a avaliação do IP.

O IP, quando considerado no espaço, para os diferentes pontos de uma bacia hidrográfica, permite a construção de um mapa das áreas de perigo na escala de bacia. Esse mapa de perigo de inundação, então, pode ser estabelecido para diferentes precipitações de projeto, permitindo a gestão de risco de inundações em áreas urbanas.

4.5 Aspectos Qualitativos

As amostras de água foram coletadas no mesmo momento em que as medições de vazão e nível foram feitas.

Após a coleta e armazenamento adequado, elas foram encaminhadas no mesmo dia para o laboratório de análises do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC – USP São Carlos (LABSAN) e mantidas resfriadas.

As amostras foram então analisadas segundo os seguintes parâmetros: pH, Turbidez, Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Carbono Orgânico Total (TOC), Nitrito, Nitrato, Amoniacal, Fósforo e presença de E. coli. Os protocolos de análise utilizados são os descritos no Standard Methods (APHA, 2005).

4.6 Visualização de dados

Neste trabalho, parte-se da premissa de que a forma como os dados são visualizados é importante no aperfeiçoamento do processo de modelagem, bem como no entendimento dos fenômenos investigados. Desta maneira, o intuito da visualização de dados é observar em escalas diferentes os diversos processos ecohidrológicos na bacia hidrográfica e o Índice de Perigo de maneira rápida, clara e com pouca perda de informação, para que seja possível refletir melhor tanto o

processo de modelagem em si (representação) quanto a relação entre os parâmetros investigados.

A forma como os dados de vazão, velocidade, nível d'água, carga de poluentes, entre outros, são visualizadas na GUI do SWMM 5.1.10 é insuficiente. Por exemplo, só é possível ver 6 (seis) séries de nós ou links simuladas de uma vez em um gráfico único. Além disso, embora a interface permita extensões (plug-ins) para um pós-processamento dos dados, tal interface não é dinâmica (não permite o ciclo de desenvolvimento-teste de forma rápida), tornando o processo de pesquisa lento.

Devido a esta limitação, optou-se pela extração dos dados no arquivo binário gerado pelo SWMM ao final da simulação com a ajuda da ferramenta *swmmtoolbox* (CERA, 2015) em conjunto com um script em R (R CORE TEAM, 2012), criado especificamente para importar as séries extraídas pela ferramenta *swmmtoolbox* para o ambiente R (Anexo C). Desta forma, as séries para todos os nós, links e sub-bacias podem ser analisadas e plotadas com grande agilidade.

Figura 3: Grafo direcional do modelo SWMM

Outra questão pertinente à visualização, é que os nós e trechos podem ser reagrupados para a obtenção de relações menos evidentes. Neste caso, elas podem ser reagrupadas conforme outros critérios, não aleatórios, tais como de escala, geomorfológicos (HORTON, 1945; RODRIGUEZ-ITURBE & VALDES, 1979; BEVEN et al., 1988) e hidrológicos (DUNNE, 1983; HEWLETT & HIBBERT, 1967; MENDIONDO & TUCCI, 1997).

No presente estudo escolheu-se a ordenação topológica por meio do tempo de concentração dos trechos modelados no SWMM.

Na Figura 3, está o grafo direcional indicando a relação de escoamento entre os nós do modelo SWMM da Bacia do Rio Monjolinho. As setas azuis indicam o sentido de escoamento. Os nós-folha, que apenas possuem setas de saída, são os pontos mais à montante dos cursos d'água. O nó vermelho corresponde exatamente ao ponto 15 das coletas experimentais deste estudo, ou seja, é o exutório da Bacia do Rio Monjolinho.

Um vez construído tal grafo, é possível obter o Tempo de Concentração da bacia do Rio Monjolinho no exutório e em todos os pontos modelados no SWMM. Essa é a finalidade do algoritmo apresentado no Anexo B.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, serão apresentados e discutidos os dados de qualidade – derivados das concentrações dos parâmetros de qualidade da água - obtidos em campo, assim como as vazões estimadas no instante das coletas de água. Dessa forma, as cargas específicas de quatro poluentes principais, Amoniacal, Fósforo Total, Demanda Bioquímica de Oxigênio e NMP de *E. coli*, serão apresentadas considerando-se a distribuição destas (cargas específicas) na bacia hidrográfica.

Depois, serão apresentados os dados de quantidade, provenientes do modelo chuva-vazão (SWMM). Estes possibilitam o cálculo da vazão relativa, Q , nos pontos de controle do modelo e o cálculo IP, Índice de Perigo.

No que diz respeito à visualização da dinâmica espaço-temporal da ecohidrologia sob a ótica da gestão de riscos para proteção civil e comunitária, o terceiro objetivo deste trabalho, a proposta de visualização será apresentada na

própria discussão sobre vazões relativas e IP, sendo ela própria uma ferramenta para a apresentação sintética dos resultados.

Por fim, a conclusão é apresentada com base na intersecção entre os dados de qualidade e quantidade.

5.1 Qualidade

Nas Tabelas 5, 6 e 7 estão os dados referentes às concentrações dos parâmetros de qualidade da água obtidas na três campanhas deste estudo.

Na Tabela 5, estão os dados de concentrações dos parâmetros de qualidade da água para os 15 pontos de estudo da Bacia do Rio Monjolinho obtidos na primeira coleta. Os valores indicados como NA significam que não foi possível obter o valor devido ao valor experimental se encontrar abaixo da capacidade de detecção do método empregado. O ponto 15 é ponto denominado Mt. G no mapa da bacia (Figura 1).

Na Tabela 6, estão as concentrações dos parâmetros de qualidade da água para os 15 pontos de estudo da Bacia do Rio Monjolinho obtidos na segunda coleta, enquanto na Tabela 7 estão as concentrações obtidas na terceira coleta.

Tabela 5: Primeira coleta: concentrações dos parâmetros de qualidade da água

Pt	OD mg/L	DBO mg/L	DQO mg/L	TOC mg/L	Nitrito mg/L	Nitrato mg/L	N-NH ₃ mg/L	FT mg/L	<i>E. coli</i> NMP/ 100 mL	pH	Turbidez NTU
1	6,2	NA	4,5	7,419	0,004	0,127	0,09	0,0304	31	6,35	2,81
2	6,9	7	20,5	7,835	0,013	0,315	0,83	0,091	57	6,6	5,77
3	5,5	15	37	12,67	0,041	0,755	0,75	0,148	2000	6,52	4,58
4	7,4	17	38	6,576	0,004	0,16	0,12	0,0939	28	6,48	5,45
5	6,5	NA	9	7,726	0,014	0,588	0,49	0,1162	1100	6,43	7,33
6	6,4	NA	5	15,58	0,02	2,267	0,23	0	67	6,52	1,38
7	5,7	10,91	24	16,76	0,57	4,033	1,75	0,3461	1600	7,3	5,93
8	6,3	NA	8,5	10,06	0,117	1,411	0,53	0,1691	2000	6,95	10
9	7,8	2,29	6,5	9,278	0,004	0,253	0,09	0,0839	240	7	6,78
10	7,5	NA	10	9,197	0,076	1,036	0,64	0,188	1300	6,72	4,6
11	6,1	NA	11,5	16,44	0,094	0,698	0,13	0,0804	2600	6,84	6,51

12	2,4	20,44	31,5	15,21	0	1,395	2,48	0,282	1600	6,67	7,8
13	1,4	30,34	58	25,43	0,67	1,778	2,5	0,4666	1400	6,78	12,9
14	7,5	NA	19,5	11,58	0,129	1,211	0,85	0,2338	2400	6,84	3,7
15	7,1	NA	8,5	6,128	0,005	0,364	0,01	0,1462	690	6,82	41,5

Tabela 6: Segunda coleta: concentrações dos parâmetros de qualidade da água

Pt	OD mg/L	DBO mg/L	DQO mg/L	TOC mg/L	Nitrito mg/L	Nitrato mg/L	N-NH ₃ mg/L	FT mg/L	<i>E. coli</i> NMP/ 100 mL	pH	Turbidez NTU
1	7,1	0	3	5,342	0,001	0,27	0,08	0,0322	66	6,68	4,66
2	7	0	3	7,134	0,028	0,44	0,1	0,1398	37	6,63	7,81
3	2,1	9,35	18	14,87	0,051	0,32	1,85	0,76	24200	6,54	7,96
4	7,4	0	15	5,037	0,002	0,22	0,05	0,098	228	6,66	6,15
5	6	0	5	6,321	0,032	0,52	0,3	0,2779	1986	6,5	9,06
6	6,3	0	0	39,31	0,038	1,95	0,11	0,0933	55	7,1	23,2
7	7,3	0	134	16,73	0,278	4,93	0,25	0,5389	1300	7,56	1,94
8	5,2	10,21	16	11,81	0,135	1,2	0,42	0,3373	1553	7,4	7,04
9	7,3	0	8	8,846	0,002	0,51	0,18	0,0898	162	7,28	12,5
10	5,9	12	12	10,94	0,055	0,9	2,14	12,879	2420	7,09	10,8
11	5	0	4	7,218	0,016	0,67	0,11	0,1974	2420	6,55	9,37
12	5,6	9,65	18	15,52	0,203	1,87	2	0,8364	3000	6,99	5,86
13	1	24,34	55	27,55	0,3	2,12	7,16	22,933	9700	6,88	12,7
14	4,3	9	13	12,53	0,156	1,17	1,97	0,8852	8700	7	10,4
15	7,5	0	4	5,634	0,003	0,69	0,25	0,0668	299	7	8,84

Tabela 7: Terceira coleta: concentrações dos parâmetros de qualidade da água

Pt	OD mg/L	DBO mg/L	DQO Mg/L	TOC mg/L	Nitrito mg/L	Nitrato mg/L	N-NH ₃ mg/L	FT mg/L	<i>E. coli</i> NMP/ 100 mL	pH	Turbidez NTU
1	6,7	0	4	7,419	0,004	0,054	0,26	0,0433	132	6,51	7,82
2	7,2	0	3	7,835	0,024	0,18	0,47	0,1533	411	6,71	10,2
3	4,7	5	14	12,67	0,124	0,518	1,1	0,4014	1986	6,72	11,5
4	7,5	0	5	6,576	0,005	0,037	0,13	0,1092	435	6,72	9,11
5	7	0	4	7,726	0,011	0,217	0,25	0,2126	1733	6,66	19

6	5,9	2	7	15,58	0,22	2,801	0,32	0,2379	76	6,81	4,11
7	7,4	0	3	16,76	0,073	5,08	0,16	0,2438	461	7,3	3,65
8	5,6	4	13	10,06	0,071	0,942	0,95	0,4731	4840	7,26	37,9
9	7,7	0	6	9,278	0,003	0,078	0,18	0,0968	231	7,17	16,6
10	7,1	0	4	9,197	0,103	0,918	1,12	0,4296	1733	7,02	16,2
11	6,6	12	33	16,44	0,006	0,229	0,7	0,1192	866	6,85	14,6
12	4,6	8	18	15,21	0,089	1,66	3,5	0,8488	32000	6,83	17,3
13	0,7	37	55	25,43	1,05	1,692	4,75	1,449	2400000	6,77	22,8
14	3,7	7,45	15	11,58	0,155	1,607	1,26	0,6142	13000	6,86	22,8
15	7,9	0	3	6,128	0,004	0,343	0,2	0,0851	1200	6,98	16,2

As respectivas vazões de cada ponto, estimadas no momento em que as amostras de água foram obtidas, estão nas Tabela 8, 9 e 10, bem como as velocidades médias e as áreas de drenagem relativas aos ponto de medição e coleta. Na Tabela 8, não foi possível determinar as velocidades nas verticais dos pontos 9 e 10 durante a coleta, portanto esses valores estão representados na tabela apenas por um traço.

Tabela 8: Primeira coleta: vazão e velocidade média

Data	Ponto	Área de Drenagem (km ²)	Velocidade Média (m/s)	Vazão (m ³ /s)
02/09/2013	1	5,72	0,22	0,184
02/09/2013	2	28,74	0,68	0,224
02/09/2013	3	37,89	0,5	0,374
02/09/2013	4	8,78	0,26	0,138
02/09/2013	5	11,49	0,32	0,162
02/09/2013	6	2,01	0,63	0,005
02/09/2013	7	3,4	0,44	0,053
02/09/2013	8	54,55	0,44	0,708
02/09/2013	9	3,21	-	-
02/09/2013	10	5,84	-	-
02/09/2013	11	4,23	0,56	0,084
02/09/2013	12	9,24	0,55	0,147
02/09/2013	13	14,41	0,63	0,202
02/09/2013	14	75,64	0,39	1,606
02/09/2013	Mt. G	5	0,08	0,007

Tabela 9: Segunda coleta: vazão e velocidade média

Data	Ponto	Área de Drenagem (km2)	Velocidade Média (m/s)	Vazão (m3/s)
14/10/2013	1	5,72	0,08	0,12
14/10/2013	2	28,74	0,16	0,159
14/10/2013	3	37,89	0,28	0,291
14/10/2013	4	8,78	0,16	0,1
14/10/2013	5	11,49	0,3	0,158
14/10/2013	6	2,01	0,34	0
14/10/2013	7	3,4	0,37	0,004
14/10/2013	8	54,55	0,27	0,685
14/10/2013	9	3,21	0,08	0,012
14/10/2013	10	5,84	0,51	0,09
14/10/2013	11	4,23	0,27	0,02
14/10/2013	12	9,24	0,27	0,083
14/10/2013	13	14,41	0,43	0,223
14/10/2013	14	75,64	0,16	0,877
14/10/2013	Mt. G	5	0,14	0,007

Tabela 10: Terceira coleta: vazão e velocidade média

Data	Ponto	Área de Drenagem (km2)	Velocidade Média (m/s)	Vazão (m3/s)
25/10/2013	1	5,72	0,08	0,142
25/10/2013	2	28,74	0,28	0,335
25/10/2013	3	37,89	0,41	0,461
25/10/2013	4	8,78	0,25	0,149
25/10/2013	5	11,49	0,39	0,245
25/10/2013	6	2,01	0,13	0,005
25/10/2013	7	3,4	0,66	0,064
25/10/2013	8	54,55	0,46	0,975
25/10/2013	9	3,21	0,22	0,024
25/10/2013	10	5,84	0,45	0,082
25/10/2013	11	4,23	0,4	0,025
25/10/2013	12	9,24	0,13	0,107

25/10/2013	13	14,41	0,52	0,264
25/10/2013	14	75,64	0,22	1,138
25/10/2013	Mt. G	5	0,24	0,012

Como já discutido, as vazões são fundamentais para, junto com a concentração de poluentes e a área das sub-bacias, permitir a análise da distribuição da carga específica de poluentes. O gráfico da Figura 4 apresenta as vazões estimadas com os dados obtidos em campo, durante as campanhas.

O gráfico apresenta, ainda, outros dados para a análise. Neste, os pontos de coletas foram agrupados por barras horizontais de mesmo tamanho para facilitar a visualização das vazões. Tais barras são preenchidas da direita para a esquerda de acordo com a proporção da área de drenagem do ponto com relação à área total da bacia. Por exemplo, o ponto 14 é o próprio exutório da bacia, então a barra está toda preenchida, pois a proporção aí é 1. O ponto 13, por outro lado, possui uma proporção de aproximadamente 0,5 (ou 50 %), então a barra que agrupa os dados de vazão está preenchida pela metade.

O eixo das abscissas é discreto e indica o ponto de coleta ao qual o grupo de vazões pertence. Os pontos estão ordenados em ordem crescente segundo a área de drenagem. Além disso, dentro de um grupo de vazões, ou seja, para vazões referentes a um mesmo ponto, a lógica de ordenação foi a crescente segundo o IPA, Índice de Precipitação Antecedente, informado na legenda dentro da caixa do gráfico, em milímetros (mm). As coletas estão indicadas pelo código C mais o número da coleta. A temperatura média do dia quando a coleta foi feita também está indicada na legenda.

O eixo das ordenadas é contínuo e indica o valor das vazões em metros cúbicos por segundo (m^3/s). Note que as vazões possuem uma barra de erro e um valor médio. Os valores de erro não foram utilizados para o cálculo das cargas de poluentes, apenas o valor médio.

Não foi possível determinar a vazão do exutório (ponto 14) durante a primeira campanha, pois não existiam condições técnicas favoráveis para isso.

Figura 4: Vazões estimadas nas três campanhas.

Com a determinação das concentrações de poluentes e das vazões é possível, finalmente, calcular a carga específica dos poluentes. Aqui, quatro variáveis foram escolhidas, mais significativas no ambiente urbano, e suas cargas específicas foram calculadas: Amoniacal, Fósforo Total, DBQ e *E. coli*.

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam as cargas específicas para amoniacal. Cada figura mostra os valores calculados para uma única campanha. A área de drenagem para cada ponto está no eixo das abscissas. Os pontos estão marcados em cima do valor correspondente e também em cor vermelha caso sejam exutórios das bacias.

Na Figura 5, resultado da primeira coleta, alguns pontos não aparecem (1, 9, 10 e 15) porque não foi possível determinar a vazão ou a concentração, o que impossibilita o cálculo da carga específica.

Figura 5: Primeira coleta: carga específica de Amoniacal

Figura 6: Segunda coleta: carga específica de Amoniacal

A amônia existe em solução tanto na forma de íon, NH_4^+ , como na forma de molécula, NH_3 , livre, não ionizada. A distribuição relativa dessas duas formas da-se de acordo com o pH do meio. Desta maneira, se o $\text{pH} < 8$, praticamente toda a amônia encontra-se na sua forma não ionizada; se $\text{pH} \approx 9,5$, teremos 50 % de cada forma em solução; e se $\text{pH} > 11$, aproximadamente toda amônia está na forma ionizada.

Isso significa que na água dos corpos d'água, onde o pH é ≈ 7 , ou mesmo levemente ácido, a forma predominante é o NH_3 , isto é, a forma não ionizada, tóxica

principalmente aos peixes. O nitrogênio também é uma das principais causas da eutrofização que, por sua vez, causa a depleção de oxigênio no meio aquático nos processos de nitrificação.

Se a poluição é recente, o nitrogênio estará basicamente na forma de Nitrogênio Orgânico e Amônia (forma ionizada ou não ionizada), mas como o pH é geralmente próximo de 7, então a forma amoniacal (NH_3) predomina.

A análise em conjunto da carga específica de amoniacal nas três coletas demonstra dois fenômenos marcantes.

O primeiro fenômeno é observado comparando-se as cargas para os mesmos pontos mas em coletas diferentes. Nota-se que o aumento do índice de precipitação (IPA) afeta a carga específica de amoniacal nos pontos: o aumento no IPA causa um aumento nas cargas específicas de amoniacal.

O segundo fenômeno, ainda mais grave e marcante, é o aumento exponencial (da montante à jusante do Rio Monjolinho, pontos 1, 2, 3, 8 e 14), verificado nas três coletas, da carga específica de amoniacal ao longo dos percursos. Além disso, tal aumento também ocorre nas sub-bacias Córrego do Gregório (pontos Mt.G -> 13), Córrego do Mineirinho (pontos 9 -> 10) e Córrego Santa Maria do Leme (pontos 4 -> 5).

Figura 7: Terceira coleta: carga específica de Amoniacal

As Figuras 8, 9 e 10 apresentam os valores para a carga específica de Fósforo Total (FT), que, assim como o nitrogênio, está envolvido no processo de eutrofização.

A carga específica de FT pode ter duas origens principais, podendo ter origem em esgotos domésticos, devido à presença de detergentes, e da própria matéria orgânica aí presente. A drenagem pluvial em áreas urbanas (fenômeno do First Flush) também pode contribuir significativamente para o aumento da carga de FT nos rios urbanos.

Naturalmente, efluentes industriais de diferentes naturezas podem contribuir para o aumento da carga específica de FT nos corpos d'água, especialmente as

relacionadas com o processamento de laticínios e carnes (aves, gado, etc) e fabricação de fertilizantes.

Com relação à dinâmica do FT na bacia do Rio Monjolinho, o aumento de carga específica segue comportamento similar ao de amoniacal.

Figura 8: Primeira coleta: carga específica de Fósforo Total

Figura 9: Segunda coleta: carga específica de Fósforo Total

Figura 10: Terceira coleta: carga específica de Fósforo Total

As Figuras 11, 12 e 13 apresentam a carga específica para a Demanda Bioquímica de Oxigênio, $DBO_{5,20}$. A DBO está diretamente ligada à quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica presente no corpo d'água.

A DBO segue a mesma tendência do Amoniacal e do FT, ou seja, há um aumento exponencial da carga específica de montante à jusante.

Figura 11: Primeira coleta: carga específica para a DBO

Figura 12: Segunda coleta: carga específica para a DBO

Figura 13: Terceira coleta: carga específica para a DBO

Nas Figuras 14, 15 e 16, estão as cargas específicas do NMP para *E. coli*.

A *E. coli*, uma bactéria termotolerante presente no trato intestinal de animais de sangue quente, não é patogênica em si, contudo sua presença indica a provável existência de outros patógenos nos corpos d'água.

Os gráficos das Figuras 14, 15 e 16, que estão em escala logarítmica, demonstram um aumento exponencial no NMP de *E. coli* de forma marcante, de jusante à montante, especialmente no cursos d'água do Córrego do Gregório (pontos Mt.G -> 11 -> 12 -> 13) e no Rio Monjolino (pontos 2, 3, 8 e 14).

Figura 14: Primeira coleta: carga específica para a *E. coli*

Figura 15: Segunda coleta: carga específica para a *E. coli*

Em suma, a distribuição espacial das cargas específicas na bacia indica uma poluição crescente em direção aos vales. Esta poluição é proveniente das áreas urbanas atravessadas pelos rios.

Figura 16: Terceira coleta: carga específica para a *E. coli*

5.2 Quantitativo

Os tempos de concentração, calculados com base no grafo direcional da bacia, foram determinados para cada nó e cada trecho de simulação. Os tempos de concentração dos nós estão na Figura 17, enquanto os referentes aos trechos, utilizados efetivamente na construção dos gráficos de lajetas, estão ordenados na Figura 18.

Os pulsos de precipitações para tempos de retorno de 2 e 50 anos estão nas Figuras 19 e 22. O tempo de duração para ambos os pulsos é de 130 minutos, o tempo de concentração de toda bacia do Rio Monjolinho (ver nó “17”, Figura 17). Note que na Figura 17 os nós N-1 até N-15 não correspondem aos pontos de coleta experimental 1 até 15, sendo apenas artefatos da nomenclatura usada no modelo SWMM. Para mais detalhes sobre esses nós (com prefixo N), por favor, consulte o modelo SWMM, onde é possível verificar exatamente a qual corpo d’água eles pertencem exatamente.

As vazões relativas de cada nó de simulação para uma chuva de projeto com T_r de 2 anos estão na Figura 20. Elas estão organizadas topologicamente segundo o tempo de concentração dos nós (eixo y), em ordem crescente. O tempo está indicado no eixo x e é discreto, ou seja, cada quadrado (ou *tiles*) corresponde a 10 minutos e a duração total da simulação é de 6 horas. Os trechos com T_c igual a zero, de L7 a L17, são os mais próximos da origem do eixo das ordenadas (eixo y).

É importante ressaltar que os trechos onde o T_c é igual a zero (L7, L1, L28, L12 e L17), em todas as simulações, apresentaram problemas quanto aos valores da Vazão Relativa (Q) e do Índice de Perigo (IP), pois na modelagem SWMM, possivelmente por algum parâmetro mal definido, eles não estão coerentes com os pulsos de precipitação. Por exemplo, com exceção do ponto L28, que é problemático por outro motivo, a dinâmica de Q e IP nos demais pontos claramente não está correta pois os picos acontecem antes do próprio pulso de precipitação, que ocorre ao redor de 1 hora após o início da simulação. Contudo, optou-se por deixá-los nos gráficos por uma questão de não omissão das problemáticas que podem surgir em simulações de chuva-vazão no modelo SWMM. É também interessante notar que tal representação das dinâmicas (via os gráficos de lajetas), é, por outro lado, uma ferramenta poderosa para depurar problemas no modelo SWMM, evidenciando o problema de forma visual.

Vertex 1	(N-1)	has SLOPE set to 0.024	and LENGTH of 2494.41	meter(s); Tc by Kirpich = 24.61742	minute(s)
Vertex 2	(N-2)	has SLOPE set to 0.01	and LENGTH of 9543.34	meter(s); Tc by Kirpich = 98.289	minute(s)
Vertex 3	(N-3)	has SLOPE set to 0.011	and LENGTH of 3483.53	meter(s); Tc by Kirpich = 43.11863	minute(s)
Vertex 4	(N-4)	has SLOPE set to 0.01	and LENGTH of 1456.1	meter(s); Tc by Kirpich = 22.46025	minute(s)
Vertex 5	(N-5)	has SLOPE set to 0.104	and LENGTH of 1162.17	meter(s); Tc by Kirpich = 7.787675	minute(s)
Vertex 6	(N-6)	has SLOPE set to 0.011	and LENGTH of 12407.58	meter(s); Tc by Kirpich = 113.5874	minute(s)
Vertex 7	(N-7)	has SLOPE set to 0.001	and LENGTH of 517.66	meter(s); Tc by Kirpich = 22.68495	minute(s)
Vertex 8	(N-8)	has SLOPE set to 0.014	and LENGTH of 3087.97	meter(s); Tc by Kirpich = 35.74442	minute(s)
Vertex 9	(N-9)	has SLOPE set to 0.017	and LENGTH of 3002.76	meter(s); Tc by Kirpich = 32.32341	minute(s)
Vertex 10	(N-10)	has SLOPE set to 0.017	and LENGTH of 5282.13	meter(s); Tc by Kirpich = 50.29239	minute(s)
Vertex 11	(N-11)	has SLOPE set to 0.015	and LENGTH of 6349.97	meter(s); Tc by Kirpich = 60.33545	minute(s)
Vertex 12	(N-12)	has SLOPE set to 0.012	and LENGTH of 15022.91	meter(s); Tc by Kirpich = 127.5699	minute(s)
Vertex 13	(N-13)	has SLOPE set to 0.013	and LENGTH of 13515.21	meter(s); Tc by Kirpich = 115.4809	minute(s)
Vertex 14	(N-14)	has SLOPE set to 0.008	and LENGTH of 678.42	meter(s); Tc by Kirpich = 13.79113	minute(s)
Vertex 15	(N-15)	has SLOPE set to 0.013	and LENGTH of 15206.87	meter(s); Tc by Kirpich = 126.9821	minute(s)
Vertex 16	(N-16)	has SLOPE set to 0.013	and LENGTH of 0	meter(s); Tc by Kirpich = 0	minute(s)
Vertex 17	(N-17)	has SLOPE set to 0.02	and LENGTH of 3250.96	meter(s); Tc by Kirpich = 32.48288	minute(s)
Vertex 18	(N-18)	has SLOPE set to 0.02	and LENGTH of 0	meter(s); Tc by Kirpich = 0	minute(s)
Vertex 19	(N-19)	has SLOPE set to 0.01	and LENGTH of 1696.06	meter(s); Tc by Kirpich = 25.3787	minute(s)
Vertex 20	(N-20)	has SLOPE set to 0.01	and LENGTH of 9852.87	meter(s); Tc by Kirpich = 99.46481	minute(s)
Vertex 21	(N-21)	has SLOPE set to 0.023	and LENGTH of 1606.79	meter(s); Tc by Kirpich = 17.90434	minute(s)
Vertex 22	(N-22)	has SLOPE set to 0.002	and LENGTH of 792.09	meter(s); Tc by Kirpich = 29.61552	minute(s)
Vertex 23	(N-23)	has SLOPE set to 0.015	and LENGTH of 6822.84	meter(s); Tc by Kirpich = 63.69285	minute(s)
Vertex 24	(N-25)	has SLOPE set to 0.018	and LENGTH of 3259.74	meter(s); Tc by Kirpich = 33.57005	minute(s)
Vertex 25	(N-26)	has SLOPE set to 0.014	and LENGTH of 928.953	meter(s); Tc by Kirpich = 14.08497	minute(s)
Vertex 26	(N-27)	has SLOPE set to 0.014	and LENGTH of 0	meter(s); Tc by Kirpich = 0	minute(s)
Vertex 27	(N-28)	has SLOPE set to 0.014	and LENGTH of 0	meter(s); Tc by Kirpich = 0	minute(s)
Vertex 28	(N-29)	has SLOPE set to 0.013	and LENGTH of 15080.91	meter(s); Tc by Kirpich = 126.1132	minute(s)
Vertex 29	(N-30)	has SLOPE set to 0.013	and LENGTH of 0	meter(s); Tc by Kirpich = 0	minute(s)
Vertex 30	(N-31)	has SLOPE set to 0.011	and LENGTH of 12449.67	meter(s); Tc by Kirpich = 113.7747	minute(s)
Vertex 31	(N-32)	has SLOPE set to 0.011	and LENGTH of 12491.21	meter(s); Tc by Kirpich = 113.6425	minute(s)
Vertex 32	(N-33)	has SLOPE set to 0.012	and LENGTH of 14928.21	meter(s); Tc by Kirpich = 127.6602	minute(s)
Vertex 33	(N-34)	has SLOPE set to 0.012	and LENGTH of 14885.21	meter(s); Tc by Kirpich = 127.6643	minute(s)
Vertex 34	(N-35)	has SLOPE set to 0.015	and LENGTH of 6194.03	meter(s); Tc by Kirpich = 59.28786	minute(s)
Vertex 35	(17)	has SLOPE set to 0.013	and LENGTH of 15606.87	meter(s); Tc by Kirpich = 129.3906	minute(s)

Figura 17: Tempo de Concentração (Tc) obtidos por Kirpich

	Link	Tc
1	L.7	0.000000
2	L.1	0.000000
3	L.28	0.000000
4	L.12	0.000000
5	L.17	0.000000
6	L.13	7.787675
7	L.18	13.791134
8	L.19	14.084975
9	L.14	17.904336
10	L.8	22.460252
11	L.29	22.684947
12	L.2	24.617420
13	L.9	25.378699
14	L.30	29.615517
15	L.20	32.323410
16	L.3	32.482877
17	L.21	33.570052
18	L.31	35.744422
19	L.10	43.118633
20	L.22	50.292389
21	L.24	59.287858
22	L.25	60.335454
23	L.26	63.692848
24	L.4	98.289004
25	L.5	99.464808
26	L.6	113.587353
27	L.15	113.642502
28	L.11	113.774674
29	L.16	115.480913
30	L.34	126.113173
31	1	126.982150
32	L.33	127.569892
33	L.32	127.660235
34	L.27	127.664277

Figura 18: Tempo de Concentração (Tc) dos trechos ordenados

Uma vez que os tempos de concentração para cada trecho e a pulso de precipitação foram determinados, os gráficos de visualização da vazão relativa e do índice de

perigo foram gerados em R após a realização dos cálculos com base nas séries temporais de Q e IP.

A vazão relativa (Figuras 20 e 23) é calculada como a proporção entre uma vazão qualquer da série, $Q(t)$, sobre o pico absoluto de vazão de toda série, $Q_{\max}$, ou seja, a vazão relativa, Q , é obtida por $Q(t)/Q_{\max}$.

De maneira geral, no caso da vazão relativa para uma precipitação com tempo de retorno de 2 anos, mostrada na Figura 20, observa-se que está aumentada nos trechos mais próximos ao exutório, ou seja, no trechos com os maiores tempos de concentração. Tais trechos estão na parte superior do gráfico, a partir do trecho L4 até o trecho L27.

Isto não é particularmente novo, mas esta forma de visualização permite uma percepção rápida e clara desse fenômeno.

Por outro lado, esta forma de visualização torna-se realmente interessante quando a vazão relativa é analisada para uma precipitação com tempo de retorno diferente, isto é, quando é utilizada para a comparação da resposta da bacia a diferentes pulsos de precipitação.

Na Figura 23, temos as vazões relativas obtidas para uma precipitação com tempo de retorno de 50 anos ao invés de apenas 2 anos. Esta figura indica que os trechos mais críticos são os com tempo de concentração maiores ou iguais ao tempo de concentração de L4.

Porém, quando o gráfico da Figura 23 é comparado com o gráfico da Figura 20, nota-se que entre o grupo de trechos com vazão relativa mais crítica há dois que se sobressaem: L16 e X1. Isso significa que os trechos L16 e X1 são os mais sensíveis a extremos de precipitação.

Da mesma forma que é possível analisar a vazão relativa por meio do gráfico de lajetas, é possível analisar o Índice de Perigo, IP.

A Figura 21 contém o gráfico do IP na bacia do Rio Monjolinho para uma precipitação com tempo de retorno de 2 anos. Nesse gráfico nota-se também um grupo de trechos a partir do trecho L4 com maiores índices de perigo.

Comparando-se o gráfico da Figura 21 com o gráfico da Figura 24, onde temos o IP para uma precipitação com tempo de retorno maior, de 50 anos, verifica-se que existem três trechos (ao invés de dois, como ocorre na vazão relativa) mais sensíveis a extremos de precipitação.

Figura 19: Chuva de projeto com T_r de 2 anos. Duração de 130 minutos

Figura 20: Vazão Relativa. Precipitação: Tr de 2 anos

Figura 21: Índice de Perigo (IP). Precipitação: Tr de 2 anos

Figura 22: Chuva de projeto com T_r de 50 anos. Duração de 130 minutos.

Figura 23: Vazão Relativa. Precipitação: Tr de 50 anos.

Figura 24: Índice de Perigo (IP). Precipitação: Tr de 50 anos.

Assim, segundo a análise por meio do gráfico de lajetas, os trechos críticos com relação à vazão relativa, e portanto mais propensos a inundações, são: o trecho do Rio Monjolinho antes de se juntar com seus tributários Córrego do Gregório e Córrego do Mineirinho (L16) e o trecho final, um pouco antes de chegar no exutório (X1), quando o Rio Monjolinho já recebeu todos os seus tributários.

A análise ainda revelou que o IP é crítico nos mesmos trechos da vazão relativa e também em mais um trecho: no trecho entre o tributário Córrego do Gregório e Mineirinho (L27).

6 CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões gerais e específicas da dissertação, conforme apresentado na seção 2, “Objetivos”.

O resultado das análises experimentais conduzidas neste estudo indica que, no que tange a distribuição espacial de cargas poluentes na bacia urbana estudada, há um aumento da carga específica de poluentes de montante à jusante. Tal aumento é mais notável na Bacia do Rio Monjolinho, na sub-bacia do Córrego do Gregório e na sub-bacia do Córrego do Tijuco Preto. Portanto, os fundos de vale são uma área perigosa aos cidadãos, com alto risco de contaminação devido à água poluída que aí existe.

Os resultados da simulação com o modelo SWMM da bacia do Rio Monjolinho indicam que a dinâmica de escoamento fluvial nesta é crítica, ou seja, com perigo de inundações tanto para precipitações com tempo de retorno de 2 anos quanto de 50 anos, nos trechos mais à jusante do Rio Monjolinho e do Córrego do Gregório. Tais resultados estão evidenciados pelos gráficos de vazão relativa.

As simulações para ambas as precipitações indicaram também que o Índice de Perigo - IP, relacionado à capacidade da correnteza arrastar uma pessoa de porte médio, é crítico apenas no trecho final (perto do exutório) do Rio Monjolinho.

Assim, foi possível obter uma representação da dinâmica no espaço (área da bacia do Rio Monjolino) e no tempo (duração da precipitação e tempo de simulação) tanto para as vazões relativas quanto para o Índice de Perigo. Com a forma de visualização apresentada foi possível obter uma representação gráfica concisa do que ocorre durante os eventos de precipitação na bacia. Mais: a interseção dos gráficos é direta e permite a identificação dos trechos críticos, permitindo a construção de um mapa de riscos da bacia hidrográfica com fins à gestão de riscos para proteção civil e comunitária.

Por fim, os resultados em conjunto demonstram que os fundos de vales urbanos são áreas muito perigosas para os cidadãos, tanto por serem áreas propícias a inundações, com um alto Índice de Perigo, quanto por serem áreas onde as pessoas podem ser contaminadas por contato com água poluída. Tais características são consequências da forma de urbanização desordenada e da falta de medidas

mitigadoras e de adaptação que levem em consideração aspectos ecohidrológicos da bacia hidrográfica em meio urbano.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABT, S. R. et al. Human stability in a high flood hazard zone. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 25, p. 881-890, 1989.
- ANGEL, S.; SHEPPARD, S. The dynamics of global urban expansion. **Transport and Urban ...**, p. 1–207, 2005.
- AKAN, A. O., **Urban Stormwater Hydrology: A Guide to Engineering Calculations**. Lancaster: Technomic Publishing Co., 1993. ISBN 0-87762-966-6.
- ALMEIDA, C. das N. **Modelagem integrada de recursos hídricos com apoio de um sistema de informações geográficas**. 2006. 115p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- ALMEIDA-NETO, P. **Hidrogramas experimentais de áreas alagadas da microbacia do rio Jacupiranguinha, Baixo Ribeira de Iguape, SP**. 2007. 152 p. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.
- ALMEIDA-NETO, P; MENDIONDO, E. M. Eco-hidrologia de pulsos sobre várzeas: conceitos, exemplos e cenários. *In*: Calijuri MC, Poli AC, Bortoletto P. **Subsídios para a sustentabilidade dos recursos hídricos: um estudo de caso em sub-bacias do Baixo Ribeira de Iguape, São Paulo, Brasil**. Editorial EESC/USP, 2008, 1 ed São Carlos, Brasil. p. 67-86.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard Methods for the Examination of water and wastewater**. 21^a ed. Washington, USA. 1085p. 2005.
- ARAÚJO, J. C.de; SANTAELLA, S. T. Gestão da qualidade. *In*: CAMPOS, N.; STUDART, T. **Gestão das águas: princípios e práticas**. Porto Alegre, RS: ABRH, 2003, 2^aed., 242p.
- ARMAS, E. D. de. **Biogeodinâmica de herbicidas utilizados em cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na sub-bacia do rio Corumbataí**. 2006. 186p. Tese (Doutorado) - Ecologia de Ecossistemas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- BARBASSA, A. P. **Simulação do efeito da urbanização sobre a drenagem pluvial na cidade de São Carlos – SP**. 1991. 328p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 1991.
- BARRETO, A. **Estudo da distribuição de metais em ambiente lótico, com ênfase na assimilação pelas comunidades biológicas e na sua quantificação no sedimento e água**. 1999. 276 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

BENASSI, R. F. **Dinâmica espaço-temporal de um sistema de áreas alagáveis na planície de inundação do rio Jacupiranguinha, Vale do Ribeira do Iguape, SP.** 2006. 152p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BERKES, F. Understanding uncertainty and reducing vulnerability: lessons from resilience thinking, **Natural Hazards** (2207) 41:283-295.2007.

BEVEN, K. J.; WOOD, E. F.; SIVAPALAN, M. On hydrological heterogeneity - Catchment morphology and catchment response. **Journal of Hydrology**, v. 100, n. 1-3, p. 353-375, 1988.

BOTTINO, F. **Estudo experimental e matemático de qualidade de água com base na ecohidrologia fluvial de pequenas bacias** : estudo de caso do rio Canha, Baixo Ribeira do Iguape, SP. 2008. 188p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

BUNN, S.E.; ARTHINGTON, A.H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic diversity. **Environmental Management**, v.30, n. 4, .492-507. 2002.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONAMA. **Resolução 369 de 28 de Março de 2006.** Disponível em:<www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res36906.xml>. Acesso em: Novembro/2013.

CAMPOS, N. Gestão de águas: novas visões e paradigmas. *In*: CAMPOS, N.; STUDART, T. **Gestão das águas**: princípios e práticas. (Ed.). ABRH, 2ªed., 2003. 242p.

CARD, S. K.; MACKINLAY, J. D.; SHNEIDERMAN, B. Readings in Information Visualization: Using Vision to Think. *In*: CARD, S. K.; MACKINLAY, J. D.; SHNEIDERMAN, B. (Eds.). . **Information Display**. The Morgan Kaufmann Series in Interactive Technologies. [s.l.] Morgan Kaufmann, 1999. v. 1stp. 686.

CAVALCANTI, M. A. M. P. **A modelagem matemática associada ao Sistema de Informação Geográfica como instrumento de previsão no estudo do impacto hidrogeológico de reservatórios.** 2002. 188p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

CERA, T. 2015. *swmmtoolbox* 0.5.5, disponível em <https://pypi.python.org/pypi/swmmtoolbox>. Acesso em 06/06/2016

COLLODEL, M. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão.** 2009. 221p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

CRONSHEY, R. **Urban hidrology for small watersheds.** US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, 1986.

DEFANTI, T. A.; BROWN, M. D.; MCCORMICK, B. H. Visualization: expanding scientific and engineering research opportunities. **Computer**, v. 22, n. 8, p. 12–16, 22–5, 1989.

DALE, V. H., BROWN, S., HAEUBER, R.A., HOBBS, N.T., HUNTLY, N., NAIMAN, R.J., RIEBSAME, W.E., TURNER, M.G. AND VALONE, T.J. ESA Report: Ecological principles and guidelines for managing the use of land. **Ecological Applications** 10(3), 639-670. 2000.

DER VEEN, A. LOGTMEIJER. C. Economic hotspots: visualizing vulnerability to flooding, **Natural Hazards** 36: 65-80, 2005.

DORNFELD, C.B. **Utilização de *Chironomus sp* (Diptera, Chironomidae) para a avaliação de qualidade de sedimentos e contaminação por metais**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, SP. 2006. 211p.

DUNNE, T. Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff. **Journal of Hydrology**, v. 65, n. 1-3, p. 25–48, 1983.

FAVA, M. C. **Modelo de Alerta Hidrológico com Base Participativa usando Sistema de Informações Voluntárias para Previsão de Enchentes**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

FRACÁCIO, R. **Estudos limnológicos e ecotoxicológicos (laboratoriais e *in situ*), com ênfase na avaliação da toxicidade de metais e de pesticidas organoclorados em peixes (*Danio rerio* e *Poecilia reticulada*) – Sub-bacia do rio Monjolinho**. 2006. 184p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

GASTALDINI M. C. C.; MENDONÇA A.S.F. Conceitos para a avaliação da qualidade da água. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. (orgs.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH. 2001. 625 páginas.

GOERL, R.F.; KOBIYAMA, M.; PELLEIN, J.R.G.M. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: Estudo de caso do município de Rio Negrinho - SC. **Boletim de Geografia**, Maringá, 30(1), p. 81-100, 2012.

GONÇALVES, J. C. de S. I. **Desenvolvimento de modelo numérico para a simulação da qualidade da água em rios utilizando o software Vensim PLE**. 2009. 203p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

HEIMLICH, R. E.; ANDERSON, W. D. **Development at the urban fringe and beyond: Impacts on agriculture and rural land** Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture. 2001.

HEWLETT, J. D.; HIBBERT, A. R. **Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas** Forest hydrology, 1967.

HINKEL, R. Vegetação Ripária: *Funções e Ecologia*. In: **I Seminário De Hidrologia Florestal: Zonas Ripárias**. 2003. Santa Catarina. Anais do I Seminário de Hidrologia Florestal, SC: 40-48p. 2003.

HOLLING, C. Resilience and stability of ecological systems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 4: 1-23. 1973.

HOLLING, C.S. AND GUNDERSON, L.H. Resilience and adaptive cycles. In *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems* (L.H. Gunderson and C.S. Holling, eds), Island Press, Washington, D.C. p. 25-62, 2002.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 56, n. 3, p. 275–370, 1945.

HULSE, D. EILERS, J., FREEMARK, K., WHITE, D. AND HUMMON, C. Planning alternative future landscapes in Oregon: evaluating effects on water quality and biodiversity. **Landscape Journal** 19(2), 1-19. 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2009). Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em Novembro/2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2010). Cidades. Disponível em: <www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>. Acesso em Janeiro/2014.

JANAUER, G. A. Ecohydrology: fusing concepts and scales. In: **Ecological Engineering**. v. 16, p. 9-16, 2000.

JONKMAN, S. N.; PENNING-ROWSELL, E. Human instability in flood flows. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 44, p. 1208-1218, 2008.

KAREIVA, P. AND WENNERGREN, U. Connecting landscape patterns to ecosystem and population processes. **Nature** 373, 299-302. 1995.

KOBIYAMA, M. Conceitos de zona ripária e seus aspectos geobiohidrológicos. In: **I Seminário De Hidrologia Florestal: Zonas RIPÁRIAS**. 2003. Santa Catarina. Anais do I Seminário de Hidrologia Florestal, SC: 2003. 1-14p.

LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. Hidrologia de Matas Ciliares. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. F. **Matas Ciliares: Conservação e Recuperação**. 2.Ed. São Paulo: EdUSP: FAPESP. 2001. 320p.

MENDIONDO, E. M., TUCCI, C.E. Escalas hidrológicas III: hipótese integradora de processos na bacia vertente, **Rev. Bras. Rec. Hídricas**, v. 2, n. 1, p. 101-122, 1997.

MENDIONDO, E. M.; CLARKE, R. T.; TOENSMANN, F. 2000a. River restoration, discharge uncertainty and floods. In: TOENSMANN, F.; KOCH, M. (ed.). **River flood defence**. Kassel, Alemanha, 2014, v. 2, p. 141-152.

MENDIONDO, E. M.; NEIFF, J. J.; DEPETTRIS, C. A. 2000b. Ecohydrology of wetlands aided by remote sensing: a case study with the revive's goals initiative. In: MAIONE, U.; LEHTO, B. M.; MONTI, R. (ed.). **New trends in water and environmental engineering for safety and life**. Rotterdam, Netherlands.

MEDIONDO, E.M. Challenging issues of urban biodiversity related to ecohydrology. **Brazilian Journal of Biology**, p. 983-1002. 2008.

METZGER, J. P. O Código Florestal tem base científica? **Conservação e Natureza**. Editora Cubo: v. 8(1): p. 1-5, 2010.

MONSTADT, J. Conceptualizing the policial ecology of urban infrastructures: insights from technology and urban studies. **Environment and Planning A**. Volume 41, 2009. P. 1924 – 1942.

MORAES, D. S. de L.; JORDÃO, B.Q. Degradação ambiental e saúde humana. **Revista Saúde Pública**. v. 36(3): p.370-374, 2002.

MORAES, L. A. F. de. A visão integrada da ecohidrologia para o manejo sustentável dos ecossistemas aquáticos. **Oecologia Brasiliensis**. 13(4), p. 676-687, 2009.

NASA, Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). ASTER L1B. USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota.

NEIFF, J. J.; Ideas para la interpretación ecológica del Paraná. **Interciencia** 15 (16): 425-441, 1990.

NUTTLE, W. K. 2002. Is ecohydrology one idea or many? **Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques**, v. 47(5): p. 805-807, October 2002.

PEHOVAZ, R. P. A. **Avaliação experimental e teórica da qualidade da água de bacias urbanas com base na ecohidrologia**. 2010. 218p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PELAEZ-RODRIQUEZ, M. **Avaliação da quantidade da água da Bacia do Alto Jacaré-Guaçu SP (Ribeirão do eijão e rio do Monjolinho) através de variáveis físicas, químicas e biológicas**. 2001. 145 p. Tese de doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

PERCY, S.; LUBCHENCO, J. **Ecossistemas e bem-estar humano: Oportunidades e desafios para empresas e a indústria**. Disponível em: < <http://www.cebds.org.br/cebds/pub-docs/pub-MEA-Oportunidades-Empresas.pdf>>. Acesso em Novembro/2013.

POLIS (2002). Assessoria Técnica para Elaboração do Plano Diretor de São Carlos. Leitura Técnica da Cidade (Produto 1). São Paulo.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS. DADOS DA CIDADE (PMSC.). Disponível em: <www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/conheca-sao-carlos/115442-dados-da-cidade-geografico-e-demografico.html>. Acesso em Novembro/2013.

R Core Team (2015). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org>.

RODRÍGUEZ-ITURBE, I.; VALDÉS, J. B. The geomorphologic structure of hydrologic response. **Water Resources Research**, v. 15, n. 6, p. 1409–1420, 1979.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model, Version 5.0: User's Manual**. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH45268. Disponível em: www.epa.gov/ednnrmrl/models/swmm/index.htm. Acesso em Janeiro/2014.

ROTAVA, J. **Índices de resiliência hídrica e de perigo para gestão do risco de inundações urbanas**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SALGADO, S. R. T. **Estudo dos parâmetros do decaimento do cloro residual em sistema de distribuição de água tratada considerando vazamento**. 2008. 145p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SÉ, J. **O rio do Monjolino e sua bacia hidrográfica como integradores de sistema ecológicos: um conjunto de informações para o início de um processo de pesquisas ecológicas, de educação, planejamento e gerenciamento ambientais a longo prazo**. 1992. 381 p. Dissertação de Mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1992.

SHAND, T. D.; COX, R.J.; BLACKA, M. J. Aulian rainfall and runoff project 10: appropriate safety criteria for vehicles. 2011.

SHIDAWARA. M. Flood hazard map distribution. **Urban Water**, v.1, p.125-129, 1999.

SICHE, R. Índices versus Indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. X, n. 2, p. 137-148, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/asoc/v10n2/a09v10n2.pdf>. Acesso em: Março de 2014.

SOUZA, T. F. **Drenagem Urbana sob Cenários de Longo Prazo visando Incentivos Ambientais**. 2008. 253p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

STEPHENSON, D. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. **Urban Water**, v. 4, p. 423-428, 2002.

THOMAZ, S.; BINI, L.M.; BOZELLI, R.L. Floods increase similarity among aquatic habitat in river-floodplain systems, **Hydrobiologia** 579(1): 1-13p, 2007.

TUCCI, C. E. M. Água no meio urbano. **Estud. av.** vol.22 n.63, São Paulo, 2008.

TUCCI, C. E. M.. Drenagem urbana. **Ciência e Cultura**, v. 55, p. 10-11, 2003.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETO, O.M. **Gestão da Água no Brasil**. Brasília, DF: UNESCO. p. 190, 2001.

UNESCO. **Ecohydrology – an interdisciplinary approach for the sustainable management of water resources**. International Hydrological Programme and Man and the Biosphere Programme, 2007.

VANNOTE, R. L. ; MINSHALL, G. W.; CUMMINS, K. W.; SEDELL, J. R.; CUSHING, C.E. **The river continuum concept**. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**. V. 37, n.1, p. 130-136, 1980.

VIANA, S. **Riqueza e distribuição de macrófitas aquáticas no rio Monjolinho e tributários (São Carlos, SP) e análise de sua relação com s variáveis físicas e químicas**. 2005. 135 p. Dissertação de Mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

WARD, J & TOCKNER, K Biodiversity: towards a unifying theme for river ecology. **Freshwater Biology** 46: 807-819p, 2001.

WARD, M. O.; GRINSTEIN, G.; KEIM, D. **Interactive Data Visualization: Foundations, Techniques, and Applications**. 2010.

ZAFFANI, A. G. **Poluição Difusa da Drenagem Urbana com Base Ecohidrológica: Diagnóstico Atual e Cenários de Longo Prazo em Bacias Urbanas de São Carlos, SP**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 170p. 2012.

ZALEWSKI, M. Ecohydrology - The scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. **Ecol. Engineering**, v.16, p. 1-8, 2000.

ZALEWSKI, M. Ecohydrology - the use of ecological and hydrologîcal processes for sustainable management of water resources. **Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologiques**. 47(5), 823-832 p, 2002.

ANEXOS

Anexo A: Script Principal de Execução

A listagem a seguir corresponde ao código principal, em linguagem R, responsável por conectar as diversas entradas e saídas de dados gerados por outros scripts (subpartes) que desempenham tarefas mais específicas.

Este código é responsável por, sequencialmente, chamar o script para geração das séries temporais das chuvas de projetos (**Anexo D**), executar a simulação do modelo em SWMM (cujo *engine* precisou ser “remendado” para compilar apropriadamente em Linux – **Anexo E**), extrair os dados gerados na simulação (**Anexo C**), fazer os cálculos do IP para cada nó, obter o Tc para cada nó (**Anexo B**), e, finalmente, gerar os “fingerprints” da bacia no espaço (nós ordenados por Tc) e no tempo (durante período de precipitação de projeto) para o IP e para as variáveis hidrológicas.

Os códigos estão acessíveis a partir do seguinte repositório Git:

<https://bitbucket.org/gusbromero/n/src>

```
#>gerar precipitacao
#>salvar precipitacao
#>plotar precipitacao
#>simular
#>gerar arquivos de saida do swmm
#>extrair tc da bacia
#>pegar levels ordenados do bacia
```

```
## CWD deve ser no dir. SWMM ##
```

```
library(ggplot2)
library(scales)
library(plyr)
library(devEMF)
```

```
source("../swmm.R")
source("../graph.R")
```

```

source("../R-scripts/gusLib.R")
source("../R-scripts/multiplot.R")
source("../IDF.R")

rainfall <- makePivot(2,130,5,0.5) #Chuva de Projeto: 130 min (~= Tc da
bacia), DeltaT = 5 min, Tr = 2 anos, pico de precipitacão em 0.5 == 50 %)

p01 <- ggplot(rainfall,aes(x=rainfall$Time,y=rainfall$Rainfall)) +
geom_bar(stat="identity") + scale_x_datetime(breaks = "1 hour",
labels=date_format("%H:%M")) + theme(axis.text.x = element_text(angle = 90,
hjust = 0, vjust=0.5)) + xlab("Tempo (h)") + ylab("P (mm/h)") #plotar
precipitacao

#ggsave(filename="pldia_5min_TR2anos.pdf",plot=p01) #salvar em PDF

rainfall <- convert2SWMM(rainfall)#converte para formato de precipitacao
que o SWMM entende

write.Tabela(rainfall,"ts05.dat",quote=FALSE,row.names=FALSE,col.names=FALSE)

swmm_command <- "../swmm_engine/swmm5 sanca_v1_with_rainfall_ts.inp
sanca_v1_with_rainfall_ts.rpt sanca_v1_with_rainfall_ts.out"

system(swmm_command) #simulacao

# === CHAIN ===

link_v<-swmmGetLinkFlowVelocity("sanca_v1_with_rainfall_ts.out") #dados
simulacao velocidade nos links

link_d<-swmmGetLinkFlowDepth("sanca_v1_with_rainfall_ts.out") #dados
sumlacao profundidade lamina dagua

IP <- link_v[,2:ncol(link_v)]*link_d[,2:ncol(link_d)] #calcula do IP=h*v

IP <- data.frame(Time=link_v[1],IP) #cola de volta o timestamp das series,
retirado para o calculo do IP

basin <- basinGraph()

tc <- computeTc(basin)

tc <- arrange(tc,Tc)

levels_ordered<-as.character(tc$Link)

levels_ordered[levels_ordered == "1"] <- "X1" #solucao de contorno para
nomenclatura atual do link do exutorio

p02<-plotTilesT02(IP,levels_order=levels_ordered) #plot do fingerprint da
bacia

#multiplot(p01,p02,cols=1) #imprime grafico e precipitacao e lajotas

link_Q<-swmmGetLinkFlowrate("sanca_v1_with_rainfall_ts.out")

p03<-plotTilesT04(link_Q,levels_order=levels_ordered) #plot do fingerprint
da bacia

emf("P_Tr2anos_3horas.emf")

p01

dev.off()

emf("IP_Tr2anos_3horas.emf")

p02

```

```

dev.off()
emf("Q_Tr2anos_3horas.emf")
p03
dev.off()

rainfall <- makePivot(5,130,5,0.5) #Chuva de Projeto: 130 min (~= Tc da
bacia), DeltaT = 5 min, Tr = 5 anos, pico de precipitacão em 0.5 == 50 %)

p01 <- ggplot(rainfall,aes(x=rainfall$Time,y=rainfall$Rainfall)) +
geom_bar(stat="identity") + scale_x_datetime(breaks = "1 hour",
labels=date_format("%H:%M")) + theme(axis.text.x = element_text(angle = 90,
hjust = 0, vjust=0.5)) + xlab("Tempo (h)") + ylab("P (mm/h)") #plotar
precipitacao

#ggsave(filename="p1dia_5min_TR2anos.pdf",plot=p01) #salvar em PDF

rainfall <- convert2SWMM(rainfall)#converte para formato de precipitacao
que o SWMM entende

write.Tabela(rainfall,"ts05.dat",quote=FALSE,row.names=FALSE,col.names=FALSE)

swmm_command <- "../swmm_engine/swmm5 sanca_v1_with_rainfall_ts.inp
sanca_v1_with_rainfall_ts.rpt sanca_v1_with_rainfall_ts.out"

system(swmm_command) #simulacao

# === CHAIN ===

link_v<-swmmGetLinkFlowVelocity("sanca_v1_with_rainfall_ts.out") #dados
simulacao velocidade nos links

link_d<-swmmGetLinkFlowDepth("sanca_v1_with_rainfall_ts.out") #dados
sumlacao profundidade lamina d'agua

IP <- link_v[,2:ncol(link_v)]*link_d[,2:ncol(link_d)] #calcula do IP=h*v
IP <- data.frame(Time=link_v[1],IP) #cola de volta o timestamp das series,
retirado para o calculo da IP

basin <- basinGraph()
tc <- computeTc(basin)
tc <- arrange(tc,Tc)

levels_ordered<-as.character(tc$Link)

levels_ordered[levels_ordered == "1"] <- "X1" #solucao de contorno para
nomenclatura atual do link do exutorio

p02<-plotTilesT02(IP,levels_order=levels_ordered) #plot do fingerprint da
bacia

#multiplot(p01,p02,cols=1) #imprime grafico e precipitacao e lajotas

link_Q<-swmmGetLinkFlowrate("sanca_v1_with_rainfall_ts.out")

p03<-plotTilesT04(link_Q,levels_order=levels_ordered) #plot do fingerprint
da bacia

emf("P_Tr5anos_3horas.emf")
p01
dev.off()
emf("IP_Tr5anos_3horas.emf")

```

```

p02
dev.off()

emf("Q_Tr5anos_3horas.emf")

p03
dev.off()

rainfall <- makePivot(10,130,5,0.5) #Chuva de Projeto: 130 min (~= Tc da
bacia), DeltaT = 5 min, Tr = 10 anos, pico de precipitacao em 0.5 == 50 %)

p01 <- ggplot(rainfall,aes(x=rainfall$Time,y=rainfall$Rainfall)) +
geom_bar(stat="identity") + scale_x_datetime(breaks = "1 hour",
labels=date_format("%H:%M")) + theme(axis.text.x = element_text(angle = 90,
hjust = 0, vjust=0.5)) + xlab("Tempo (h)") + ylab("P (mm/h)") #plotar
precipitacao

#ggsave(filename="p1dia_5min_TR2anos.pdf",plot=p01) #salvar em PDF

rainfall <- convert2SWMM(rainfall)#converte para formato de precipitacao
que o SWMM entende

write.Tabela(rainfall,"ts05.dat",quote=FALSE,row.names=FALSE,col.names=FALSE)

swmm_command <- "../swmm_engine/swmm5 sanca_v1_with_rainfall_ts.inp
sanca_v1_with_rainfall_ts.rpt sanca_v1_with_rainfall_ts.out"

system(swmm_command) #simulacao

# === CHAIN ===

link_v<-swmmGetLinkFlowVelocity("sanca_v1_with_rainfall_ts.out") #dados
simulacao velocidade nos links

link_d<-swmmGetLinkFlowDepth("sanca_v1_with_rainfall_ts.out") #dados
sumlacao profundidade lamina dagua

IP <- link_v[,2:ncol(link_v)]*link_d[,2:ncol(link_d)] #calcula do IP=h*v

IP <- data.frame(Time=link_v[1],IP) #cola de volta o timestamp das series,
retirado para o calculo da IP

basin <- basinGraph()

tc <- computeTc(basin)

tc <- arrange(tc,Tc)

levels_ordered<-as.character(tc$Link)

levels_ordered[levels_ordered == "1"] <- "X1" #solucao de contorno para
nomenclatura atual do link do exutorio

p02<-plotTilesT02(IP,levels_order=levels_ordered) #plot do fingerprint da
bacia

#multiplot(p01,p02,cols=1) #imprime grafico e precipitacao e lajotas

link_Q<-swmmGetLinkFlowrate("sanca_v1_with_rainfall_ts.out")

p03<-plotTilesT04(link_Q,levels_order=levels_ordered) #plot do fingerprint
da bacia

emf("P_Tr10anos_3horas.emf")

p01
dev.off()

```

```

emf("IP_Tr10anos_3horas.emf")
p02
dev.off()
emf("Q_Tr10anos_3horas.emf")
p03
dev.off()

rainfall <- makePivot(50,130,5,0.5) #Chuva de Projeto: 130 min (~= Tc da
bacia), DeltaT = 5 min, Tr = 50 anos, pico de precipitaco em 0.5 == 50 %)
p01 <- ggplot(rainfall,aes(x=rainfall$Time,y=rainfall$Rainfall)) +
geom_bar(stat="identity") + scale_x_datetime(breaks = "1 hour",
labels=date_format("%H:%M")) + theme(axis.text.x = element_text(angle = 90,
hjust = 0, vjust=0.5)) + xlab("Tempo (h)") + ylab("P (mm/h)") #plotar
precipitacao
#ggsave(filename="p1dia_5min_TR2anos.pdf",plot=p01) #salvar em PDF
rainfall <- convert2SWMM(rainfall)#converte para formato de precipitacao
que o SWMM entende
write.Tabela(rainfall,"ts05.dat",quote=FALSE,row.names=FALSE,col.names=FALSE)
swmm_command <- "../swmm_engine/swmm5 sanca_v1_with_rainfall_ts.inp
sanca_v1_with_rainfall_ts.rpt sanca_v1_with_rainfall_ts.out"
system(swmm_command) #simulacao
# === CHAIN ===
link_v<-swmmGetLinkFlowVelocity("sanca_v1_with_rainfall_ts.out") #dados
simulacao velocidade nos links
link_d<-swmmGetLinkFlowDepth("sanca_v1_with_rainfall_ts.out") #dados
sumlacao profundidade lamina dagua
IP <- link_v[,2:ncol(link_v)]*link_d[,2:ncol(link_d)] #calcula do IP=h*v
IP <- data.frame(Time=link_v[1],IP) #cola de volta o timestamp das series,
retirado para o calculo da IP
basin <- basinGraph()
tc <- computeTc(basin)
tc <- arrange(tc,Tc)
levels_ordered<-as.character(tc$Link)
levels_ordered[levels_ordered == "1"] <- "X1" #solucao de contorno para
nomenclatura atual do link do exutorio
p02<-plotTilesT02(IP,levels_order=levels_ordered) #plot do fingerprint da
bacia
#multiplot(p01,p02,cols=1) #imprime grafico e precipitacao e lajotas
link_Q<-swmmGetLinkFlowrate("sanca_v1_with_rainfall_ts.out")
p03<-plotTilesT04(link_Q,levels_order=levels_ordered) #plot do fingerprint
da bacia

emf("P_Tr50anos_3horas.emf")
p01

```

```
dev.off()  
emf("IP_Tr50anos_3horas.emf")  
p02  
dev.off()  
emf("Q_Tr50anos_3horas.emf")  
p03  
dev.off()
```

Anexo B: Grafo Direcional para obtenção do Tempo de Concentração

O script Bash a seguir deve ser utilizado primeiramente para extrair e dividir o arquivo de entrada padrão do SWMM, os arquivos com extensão .inp, em 4 (quatro) outros arquivos que, esses sim, serão utilizados na obtenção do Tempo de Concentração da bacia modelada no SWMM por meio de um grafo direcional.

Logo após a listagem do script Bash, encontra-se o programa em R que irá utilizar os arquivos gerados pelo script para montar uma representação da bacia hidrográfica por meio de um grafo direcional.

Uma vez que a representação da bacia é obtida, o algoritmo aqui proposto percorre os diversos nós da grafo, que correspondem aos pontos de controle no modelo SWMM, e, com base na declividade e nos maiores comprimentos de talweg, utilizando-se o método de Kirpich, o tempo de concentração total da bacia é calculado (T_c) para cada ponto, assim como o tempo de concentração total de bacia. Esses tempos – de cada ponto – são importantes para ordenação dos nós gráficos de “fingerprint” da bacia apresentados nesse trabalho, onde os nós de simulação estão ordenados em ordem crescente no eixo das abscissas segundo o T_c . Além disso, o T_c total da bacia é necessário para a geração das precipitações de projetos (Chuvas de Projetos) condizentes com a bacia estudada.

```
#!/bin/bash

## Sections to be sliced from .inp SWMM input file.
## The data contained in these sections will be used
## to build a weighted directional graph and, after that,
## a specific algorithm will calculate the concentration time
## for each vertex. The graph's vertices are the control points in
## our SWMM Model.

edges_filename=edges.txt      ## CONDUITS Section
coord_filename=coordinates.txt ## COORDINATES Section
verti_filename=vertices.txt   ## JUNCTIONS Section
outfl_filename=outfalls.txt   ## OUTFALLS Section

if [ ! -f ${1} ]; then
    echo "Verify SWMM .inp filename!"
```



```

    exit 1
fi

dos2unix $1

echo "SWMM .inp File >> ${1} <<"

echo -n "Slicing Graph Edges data from [CONDUITS] Section: "
awk '/\[CONDUITS\]/,/^$/ {if ($0 !~ /\;/ && $0 !~ /^$/ ) print $0}' ${1} >
${edges_filename} && echo "${edges_filename} created."

echo -n "Slicing Graph Vertices and Outfalls X-Y Coord. data from
[COORDINATES] Section: "
awk '/\[COORDINATES\]/,/^$/ {if ($0 !~ /\;/ && $0 !~ /^$/ ) print $0}' ${1} >
${coord_filename} && echo "${coord_filename} created."

echo -n "Slicing Graph Vertices Z Coordinate data from [JUNCTIONS] Section:
"
awk '/\[JUNCTIONS\]/,/^$/ {if ($0 !~ /\;/ && $0 !~ /^$/ ) print $0}' ${1} >
${verti_filename} && echo "${verti_filename} created."

echo -n "Slicing Graph Outfalls Z Coordinate data from [OUTFALLS] Section:
"
awk '/\[OUTFALLS\]/,/^$/ {if ($0 !~ /\;/ && $0 !~ /^$/ ) print $0}' ${1} >
${outfl_filename} && echo "${outfl_filename} created."

```

O código abaixo é responsável pela geração do grafo que representa todos os pontos modelados no SWMM. A sua saída é uma tabela ordenada dos tempos de concentração para ponto do modelo (para cada nó). A ideia principal aqui é percorrer todos os caminhos a partir dos nós folha (nós que representam as nascentes) até o exutório, seguindo a direção do grafo (a mesma direção idealizada que uma gota de chuva percorre até chegar o exutório) e somando o comprimento dos talwegs, sempre considerando, no caso de um confluência, o talveg com o maior comprimento para a aplicação do método.

```

### Como usar isso?
### > source("graph.R")
### > basin <- basinGraph(), para gerar a bacia
### Note que os arquivos de input para basinGraph() devem ser a
### ajustados na propria funcao.
### Calcular o Tempo de Concentração (Tc) para cada vértice do grafo:

```

```

### > basin <- computeTc(basin)
### Os Tcs para cada vértice (ou nó) estão no vetor retornado por:
### > V(basin)$tc
###
### Depois, monte um data.frame para ordenar os Tcs:
### > tc_df <- data.frame(V=1:length(V(basin)$tc),Tc=V(basin)$tc/60)
### - Tc foi dividido por 60 para "sair" em horas.
### Ordene tc_df segundo a coluna Tc:
### > library(plyr)
### > tc_df <- arrange(tc_df,Tc)
### Pegue os nós ordenados pelo Tc da seguinte forma:
### > tc_df$V
### Pronto!
### Se quiser plotar o grafo:
###
tkplot(basin,vertex.frame.color="black",vertex.color="white",vertex.label.c
ex=0.8,edge.color="blue")

```

```
require(igraph)
```

```
basinGraph <- function()
```

```

{
  ### Arquivos de input, recortados a partir do
  ### arquivo de input do SWMM, *.inp
  ### Os arquivos foram gerados de acordo com as
  ### seções no arquivo de *.inp.

  edges_filename <- "edges.txt"      # Section Conduits
  coord_filename <- "coordinates.txt" # Section Coordinates
  verti_filename <- "vertices.txt"    # Section Junctions
  outfl_filename <- "outfalls.txt"    # Section Outfalls

  Tabela<-read.Tabela("edges.txt",skip=1,header=FALSE)
  edges<-Tabela[2:3]
  edges_names<-Tabela[1]
  edges_length<-Tabela[4]
  # Edges
  edges<-data.frame(edges,edges_names,edges_length)
  colnames(edges) <- c("inlet","outlet","name","length")

  # Junctions + Outfalls Elevation

```

```

Tabela<-read.Tabela("vertices.txt",skip=1,header=FALSE)
junctions_elevation<-Tabela[2]
colnames(junctions_elevation) <- "elevation"
Tabela<-read.Tabela("outfalls.txt",skip=1,header=FALSE)
outfalls_elevation<-Tabela[2]
colnames(outfalls_elevation) <- "elevation"
vertices_elevation <- rbind(junctions_elevation,outfalls_elevation)

Tabela <- read.Tabela("coordinates.txt",skip=1,header=FALSE)
vertices_name <- Tabela[1]
colnames(vertices_name) <- "name"
vertices_coord_x <- Tabela[2]
colnames(vertices_coord_x) <- "X" # Talvez você se pergunte o porquê de um
'x' maiúsculo. A resposta é
# que isso deve ser um bug no igraph 1.0.0. No
igraph 0.7.0, se esse atributo
# fosse chamado de 'x' minúsculo, não teria
problema. Mas no 1.0.0 isso é um problema!
vertices_coord_y <- Tabela[3]
colnames(vertices_coord_y) <- "y"
vertices_w <- data.frame(w=rep(0,nrow(Tabela)))
vertices_source <- data.frame(source=rep(0,nrow(Tabela)))
vertices_slope <- data.frame(slope=rep(0,nrow(Tabela)))
vertices_tc <- data.frame(tc=rep(0,nrow(Tabela)))

# Vertices
vertices<-
data.frame(vertices_name,vertices_elevation,vertices_coord_x,vertices_coord
_y,vertices_w,vertices_source,vertices_slope,vertices_tc)

# Build graph
basin <- graph.data.frame(edges,directed=TRUE,vertices=vertices)
sources <- getSources(basin)
basin <- setSources(basin,sources)
basin <- setWeight(basin)

return(basin)
}

getSources <- function(basin)
{
v <- get.adjlist(basin, mode=c("in"))

```

```

sources <- which(sapply(v, length) == 0)
}

getOutfall <- function(basin)
{
  # Currently, just one outfall is supported.
  # If the basin contains more than 1 outfall,
  # this function will return them, but
  # further methods will fail!

  v <- get.adjlist(basin, mode=c("out"))
  outfall <- which(sapply(v,length) == 0 )
}

setSources <- function(basin, sources)
{
  V(basin)$source[sources] <- sources
  basin
}

weightVertices <- function(basin, v_source)
{
  cat("v_source=",v_source,"\n")

  while(1 == 1) #FIXME, it can be done as a single statement.
  {

    v_next <- as.vector(basin[[v_source]][[1]])

    # print(v_source)
    # print(v_next)

    if( identical(v_next, integer(0)) == TRUE)
    # if(v_next == NA)
    {
      # e <- incident(basin,v_source,mode=c("out"))
      # len <- E(basin)$length[e]

      print("ending")
    }
  }
}

```

```

#   if( V(basin)$w[v_next] < ( V(basin)$w[v_source] + len ) )
#       V(basin)$w[v_next] <- V(basin)$w[v_source] + len

#               cat("Updating          weight          of
OUTFALL",V(basin)$name[v_next],"to",V(basin)$w[v_next],"\\n")
    print("Outfall reached. No more walk.\\n")
    return(basin)
}

else #FIXME, read above FIXME
{

e <- incident(basin,v_source,mode=c("out"))
len <- E(basin)$length[e]

print("normal")
if( V(basin)$w[v_next] < ( V(basin)$w[v_source] + len ) )
{
    V(basin)$w[v_next] <- V(basin)$w[v_source] + len
    V(basin)$source[v_next] <- V(basin)$source[v_source]
    cat("Updating          weight          of
VERTEX",V(basin)$name[v_next],"to",V(basin)$w[v_next],"o>
",V(basin)$source[v_next],"\\n")
    }
    }
    v_source <- v_next
}
}

setWeight <- function(basin)
{
for (i in 1:vcount(basin))
    basin <- weightVertices(basin, i)

    return(basin)
}

computeTc <- function(basin)
{
link_name <-c()
link_tc    <-c()

```

```

for (vertex in 1:vcount(basin))
{
  if (V(basin)$source[vertex] != vertex)
  {
    vertex_source <- V(basin)$source[vertex]

    vertex_X <- V(basin)$X[vertex]
    vertex_source_X <- V(basin)$X[vertex_source]

    vertex_Y <- V(basin)$y[vertex]
    vertex_source_Y <- V(basin)$y[vertex_source]

    X <- abs(vertex_X - vertex_source_X)
    Y <- abs(vertex_Y - vertex_source_Y)

    ## Compute Distance (m), if input unit is CMS
    Distance <- sqrt(X^2 + Y^2)

    vertex_Elevation <- V(basin)$elevation[vertex]
    vertex_source_Elevation <- V(basin)$elevation[vertex_source]

    ## Compute Elevation (m), if input unit is CMS
    Elevation <- abs(vertex_Elevation - vertex_source_Elevation)

    ## Compute Slope
    # print(Elevation)
    # print(Distance)
    Slope <- Elevation / Distance
    # print(Slope)
    V(basin)$slope[vertex] <- Slope
    V(basin)$tc[vertex] <-
    Kirpich(V(basin)$w[vertex],V(basin)$slope[vertex])

    cat("Vertex",vertex,"\t( ",V(basin)$name[vertex]," )","\thas SLOPE set
to",round(Slope,3),"\tand LENGTH of",V(basin)$w[vertex],"\tmeter(s);", "Tc
by Kirpich =",V(basin)$tc[vertex],"minute(s)\n")

    out_going_edge <- as.numeric(incident_edges(basin, vertex,
mode=c("out")))

    if ( ! is.na(out_going_edge) )#testa se nao eh o exutorio pq se for nao
existe link de saida

```

```

{
  link_name <- c(link_name, E(basin)[out_going_edge]$name)
  link_name <- gsub("-", ".", link_name)
  link_tc <- c(link_tc, V(basin)$tc[vertex])
}

}
else
{
  V(basin)$tc[vertex] <- 0;
  cat("Vertex", vertex, "\t( ", V(basin)$name[vertex], " )", "\thas SLOPE set
to", round(Slope, 3), "\tand LENGTH of", V(basin)$w[vertex], "\tmeter(s);", "Tc
by Kirpich =", V(basin)$tc[vertex], "minute(s)\n")

  out_going_edge <- as.numeric(incident_edges(basin, vertex,
mode=c("out")))
  if ( ! is.na(out_going_edge) ) #testa se nao eh o exutorio pq se for nao
existe link de saida
  {
    link_name <- c(link_name, E(basin)[out_going_edge]$name)
    link_name <- gsub("-", ".", link_name)
    link_tc <- c(link_tc, V(basin)$tc[vertex])

  }

}
}

df <- data.frame(Link=link_name, Tc=link_tc)
return(df)

#return(basin)
}

Kirpich <- function(L, S)
{
  # L -> Comprimento do talvegue (m)

  L <- L/1000 # Formula needs length in (km)

  return(((3.989*L)^0.77)*S^(-0.385)) # Adicionar ref.desse Método}

```

Anexo C: Extração de Dados Binários gerados pelo SWMM

O script R apresentado neste anexo consiste praticamente numa pequena interface entre o SWMM e o R, utilizando-se a ferramenta *swmmtoolbox*, desenvolvida por Tim Cera. Sua função é, após a simulação do modelo SWMM, extrair os dados hidrológicos resultantes da simulação e importá-los para dentro do R, onde os cálculos e gráficos são efetivamente feitos e gerados.

A entrada para este script é um arquivo de dados gerado pelo SWMM – arquivos com a extensão *.out* – enquanto a saída consiste em diversos data frames (data.frame) em R, de acordo com cada variável hidrológica, como velocidade nos pontos de controle, vazão e altura da lâmina d'água. Esses dados são importantes, por exemplo, para o cálculo do IP (Índice de Perigo) em todos os nós de controle (vide texto).

```
#####
#This function get all values of a given variable for all objects of
# a given type
#input: type of object (node,link, conduit,etc)
#       variable (height, flow, etc)
#
#output: data frame for each object
#FIXME: "var" has no use
#####

var4link <- c("Flow_rate","Flow_depth");
var4node <- c("Total_inflow");

#Pega apenas o valor dos objetos do tipo "link" e apenas o valores para
"Flow_rate"

#Antes era: swmm_GetObj(type,var,swmm_bin), onde type é o tipo, var é a
variável dentro do tipo e swmm_bin é a saída binária do SWMM

swmmGetLinkFlowrate <- function(file)
{
  swmm_exec <- c("/root/swmm/swmm5/swmm5")
  swmm_binout <- file
  swmmtoolbox_exec <- "swmmtoolbox"
  swmmtoolbox_cmd <- "catalog"

  cmd <- paste(swmmtoolbox_exec, swmmtoolbox_cmd, swmm_binout)
```



```

outs <- system(cmd, intern=TRUE)

# if(type == "link")
# {
  swmmtoolbox_cmd <- "extract"
  paste(swmmtoolbox_exec,swmmtoolbox_cmd,swmm_binout)

  outs_split <- strsplit(outs,',')
  objIndices <- which(apply(outs_split,"[",1) == "link")
  objNames <- apply(outs_split,"[",2)[objIndices]

  swmmtoolbox_objects <- paste("link","",objNames,"0",sep="")
  swmmtoolbox_cmd
  paste(swmmtoolbox_exec,swmmtoolbox_cmd,swmm_binout,swmmtoolbox_objects) <-
  print(swmmtoolbox_cmd)

  ll <- list() #Quiz: pq quando remove isso o return retornar uma lista com
5 elementos, ao invés de apenas 2?

  for(i in 1:length(swmmtoolbox_cmd))
# for(i in 1:2)
  {
    print(swmmtoolbox_cmd[i]);
    vls <- system(swmmtoolbox_cmd[i], intern=TRUE)
    vls <- vls[2:length(vls)]
# vls <- strsplit(vls," , ") not used any more since swmmtoolbox 0.4
    vls <- strsplit(vls,"") #used since swmmtoolbox 0.5.1
    df <- data.frame(matrix(unlist(vls), ncol = 2, byrow = TRUE),
stringsAsFactors = FALSE)
    names(df) = c("Time", "Flow_rate")
    df_Time <- as.POSIXct(df$Time, format = "%Y-%m-%d %H:%M:%S", tz="UTC")
    df_Flow_rate <- as.numeric(df$Flow_rate)
    dd <- data.frame(df_Time,df_Flow_rate)
    names(dd) = c("Time", "Flow_rate") #Fixme
    ll <- c(ll,list(dd)) #Fixme, add SWMM object name as list reference
    names(ll)[i] <- objNames[i]
  }

  print(summary(ll))

```

```

dff <- data.frame(ll[[1]][1], sapply(ll, "[", 2))
return(dff)

# }

# else return(1)

}

#Pega apenas o valor dos objetos do tipo "link" e apenas o valores para
"Flow_rate"

#Antes era: swmm_GetObj(type,var,swmm_bin), onde type é o tipo, var é a
variável dentro do tipo e swmm_bin é a saída binária do SWMM

swmmGetLinkFlowDepth <- function(file)
{
  swmm_exec <- c("/root/swmm/swmm5/swmm5")
  swmm_binout <- file
  swmmtoolbox_exec <- "swmmtoolbox"
  swmmtoolbox_cmd <- "catalog"

  cmd <- paste(swmmtoolbox_exec, swmmtoolbox_cmd, swmm_binout)
  cat("Executing command: ",cmd,"\n")
  outs <- system(cmd, intern=TRUE)

  # if(type == "link")
  # {
  swmmtoolbox_cmd <- "extract"
  paste(swmmtoolbox_exec,swmmtoolbox_cmd,swmm_binout)

  outs_split <- strsplit(outs,',')
  objIndices <- which(sapply(outs_split,"[",1) == "link")
  objNames <- sapply(outs_split,"[",2)[objIndices]

  swmmtoolbox_objects <- paste("link,",objNames,",1",sep="")
  swmmtoolbox_cmd
  paste(swmmtoolbox_exec,swmmtoolbox_cmd,swmm_binout,swmmtoolbox_objects)
  print(swmmtoolbox_cmd)
}

```

ll <- list() #Quiz: pq quando removo isso o return retornar uma lista com 5 elementos, ao invés de apenas 2?

```
for(i in 1:length(swmmtoolbox_cmd))
{
  print(swmmtoolbox_cmd[i]);
  vls <- system(swmmtoolbox_cmd[i], intern=TRUE)
# print("*** vls **")
  vls <- vls[2:length(vls)]
# print(vls)
# vls <- strsplit(vls," , ")
  vls <- strsplit(vls,"")
  df <- data.frame(matrix(unlist(vls), ncol = 2, byrow = TRUE),
stringsAsFactors = FALSE)
  names(df) = c("Time", "Flow_depth")
  df_Time <- as.POSIXct(df$Time, format = "%Y-%m-%d %H:%M:%S", tz="UTC")
  df_Flow_depth <- as.numeric(df$Flow_depth)
  dd <- data.frame(df_Time, df_Flow_depth)
  names(dd) = c("Time", "Flow_depth") #Fixme
  ll <- c(ll, list(dd)) #Fixme, add SWMM object name as list reference
  names(ll)[i] <- objNames[i]
}

print(summary(ll))
dff <- data.frame(ll[[1]][1], sapply(ll, "[", 2))
return(dff)
}
```

#Pega apenas o valor dos objetos do tipo "link" e apenas o valores para "Flow_rate"

#Antes era: swmm_GetObj(type,var,swmm_bin), onde type é o tipo, var é a variável dentro do tipo e swmm_bin é a saída binária do SWMM

```
swmmGetLinkFlowVelocity <- function(file)
```

```
{
  swmm_exec <- c("/root/swmm/swmm5/swmm5")
  swmm_binout <- file
  swmmtoolbox_exec <- "swmmtoolbox"
  swmmtoolbox_cmd <- "catalog"
```

```
cmd <- paste(swmmtoolbox_exec, swmmtoolbox_cmd, swmm_binout)
outs <- system(cmd, intern=TRUE)
```

```

swmmtoolbox_cmd <- "extract"
paste(swmmtoolbox_exec,swmmtoolbox_cmd,swmm_binout)

outs_split <- strsplit(outs,',')

objIndices <- which(sapply(outs_split,"[",1) == "link")
objNames    <- sapply(outs_split,"[",2)[objIndices]

swmmtoolbox_objects <- paste("link,",objNames,",2",sep="")
swmmtoolbox_cmd
paste(swmmtoolbox_exec,swmmtoolbox_cmd,swmm_binout,swmmtoolbox_objects) <-
print(swmmtoolbox_cmd)

ll <- list() #Quiz: pq quando removo isso o return retornar uma lista com
5 elementos, ao invés de apenas 2?

for(i in 1:length(swmmtoolbox_cmd))
{
  print(swmmtoolbox_cmd[i]);
  vls <- system(swmmtoolbox_cmd[i], intern=TRUE)
  vls <- vls[2:length(vls)]
  vls <- strsplit(vls,",")
  df    <- data.frame(matrix(unlist(vls), ncol = 2, byrow = TRUE),
stringsAsFactors = FALSE)
  names(df) = c("Time","Flow_velocity")
  df_Time <- as.POSIXct(df$Time, format = "%Y-%m-%d %H:%M:%S", tz="UTC")
  df_Flow_velocity <- as.numeric(df$Flow_velocity)
  dd <- data.frame(df_Time,df_Flow_velocity)
  names(dd) = c("Time","Flow_velocity") #Fixme
  ll <- c(ll,list(dd)) #Fixme, add SWMM object name as list reference
  names(ll)[i] <- objNames[i]
}

print(summary(ll))
dff <- data.frame(ll[[1]][1],sapply(ll,"[",2))
return(dff)
}

```

```

swmmGetRainfall <- function(file)
{
  swmm_exec <- c("/root/swmm/swmm5/swmm5")
  swmm_binout <- file
  swmmtoolbox_exec <- "swmmtoolbox"
  swmmtoolbox_cmd <- "catalog"

  cmd <- paste(swmmtoolbox_exec, swmmtoolbox_cmd, swmm_binout)
  outs <- system(cmd, intern=TRUE)

  swmmtoolbox_cmd <- "extract"
  paste(swmmtoolbox_exec, swmmtoolbox_cmd, swmm_binout)

  outs_split <- strsplit(outs, ',')
  objIndices <- which(sapply(outs_split, "[", 1) == "system")
  objNames <- sapply(outs_split, "[", 2)[objIndices]

  swmmtoolbox_objects <- paste("system,", objNames, ",1", sep="")
  swmmtoolbox_cmd
  paste(swmmtoolbox_exec, swmmtoolbox_cmd, swmm_binout, swmmtoolbox_objects) <-
  print(swmmtoolbox_cmd)

  ll <- list() #Quiz: pq quando remove isso o return retornar uma lista com
5 elementos, ao invés de apenas 2?

  for(i in 1:length(swmmtoolbox_cmd))
  {
    print(swmmtoolbox_cmd[i]);
    vls <- system(swmmtoolbox_cmd[i], intern=TRUE)
    vls <- vls[2:length(vls)]
    vls <- strsplit(vls, ",")
    df <- data.frame(matrix(unlist(vls), ncol = 2, byrow = TRUE),
stringsAsFactors = FALSE)
    names(df) = c("Time", "Rainfall")
    df_Time <- as.POSIXct(df$Time, format = "%Y-%m-%d %H:%M:%S", tz="UTC")
    df_Rainfall <- as.numeric(df$Rainfall)
    dd <- data.frame(df_Time, df_Rainfall)
    names(dd) = c("Time", "Rainfall") #Fixme
    ll <- c(ll, list(dd)) #Fixme, add SWMM object name as list reference
    names(ll)[i] <- objNames[i]
  }
}

```

```
print(summary(l1))  
dff <- data.frame(l1[[1]][1], sapply(l1, "[", 2))  
return(dff)  
}
```

Anexo D: Algoritmo de Blocos Alternados

O script abaixo é simples e tem como único objetivo a geração de chuvas de projeto pertinentes apenas à Bacia do Rio Monjolinho. Aqui, utiliza-se a afamada curva IDF obtida por Barbassa para a obtenção das precipitações dados diferentes tempos de retorno. Naturalmente, o algoritmo apresentado pode ser facilmente adaptado para outras curvas IDF, bastando, para tanto, a substituição da equação dentro da função IDF (vide abaixo no código).

A entrada para o script é a duração da chuva de projeto, em minutos, o tempo de retorno, em anos, e a posição do pico de precipitação – quartis –, em porcentagem (0%, 25 %, 50 %, etc). Sendo que a saída é uma série temporal de precipitação pronta para ser utilizada nas simulações do SWMM.

```
#### Funcao IDF para So Carlos - SP, de acordo como o estabelecido
#### por Barbassa em sua tese de doutorado: BARBASSA, A. P. "Simulacao
#### do Efeito de Urbanizacao sobre a Drenagem Pluvial na Cidade de So
#### Carlos-SP". 1991. 328 pp. EESC - USP So Carlos.

#### td -> Durao da Chuva (min)
#### Tr -> Tempo de Retorno da Chuva (anos)
#### i (return) -> Intensidade da Chuva (mm/h)

IDF <- function (td,Tr)
{
  i = 1519*(Tr^0.236)/((td+16)^0.935)
  return(i)
}

#### A partir do Mtodo dos Blocos Alternados,
#### gerar a chuva sinttica com base na IDF.
#### ed -> durao do evento de precipitao (min)
#### g -> discretizao do durao do evento, passos (min)
#### a funcao retorna uma serie de precipitacao, com um timestamp
#### e a precipitacao em (mm).
#### T -> Tempo de Retorno
```

```

makeRainfall <- function(ed=180, g=5, T=10)
{

  #TODO: arrumar nome horrvel de variveis: ed, g & T
  tt <- seq(0,ed,g)

  idf_ts <- IDF(tt,Tr=T)

  #converte os minutos para horas, ja que a funcao IDF retorna (mm/h)
  idf_ts <- idf_ts * tt/60
  #print(idf_ts)

  ts_tmp <- c()

  for (i in seq(1,length(tt)-1))
  {
    ts_tmp[i] <- idf_ts[i+1] - idf_ts[i]
  }

  #um instante inicial qualquer
  T1 <- as.POSIXct("01/10/2013 00:00:00", format="%d/%m/%Y %H:%M:%S",
tz="UTC")

  #uma srie de tempo a partir desse instante inicial + 1 minuto

  time_seq <- seq(T1+60,T1+ed*60,by=g*60)
  data_seq <- ts_tmp

  #precipitao em mm/h
  precipitation <- data.frame(Time=time_seq,Rainfall=data_seq)
  precipitation
}

#### Funcao Principal, que, dado
#### t -> Duracao da Chuva (min)
#### Tr -> Tempo de Retorno da Chuva (anos)
#### n -> Posio do Pico de precipitao (mm)
#### s -> Granulao da Precipitao (min); mnimo = 1 minuto, mximo = t
#### p -> um valor entre 0 e 1 (0 - 100%) indicando onde o pico de
precipitacao

```



```

#### ocorre na serie. Por exemplo, p=0.5, o hietograma terá um pico
no meio
#### gera uma serie temporal para ser utilizada no SWMM
makePivot <- function(Tr,t,s,p=0.5) {

  is.odd <- function(x) { x %% 2 != 0 }
  is.even <- function(x) { x %% 2 == 0 }

  rain_ts <- makeRainfall(ed=t,g=s,T=Tr)$Rainfall
  rain_stub <- makeRainfall(ed=t,g=s,T=Tr) # remendo, sem tempo pra fazer
algo decente

                                     # a ideia aqui é usar o rain_stub so para
armazenar e usar depois os

                                     # timestamps ;-)

  len <- length(rain_ts)             #total time series length

  #remendo, sem tempo pra pensar
  if (p == 0)
    n = 1
  else if ( p > 0 && p < 1 )
    n = len*p
  else
    stop(p, " must be a value between 0 and 1, where 0 is 0 % and 1 meens 100
%.");

  if (n < 1 || n > len)
  {
    stop(n, " is an invalid position. It has to be between ",1," and
",len, ".")
  }

  if (n == 1)
  {
    return(rain_stub)
  }

  if (n == len)
  {
    rain_ts <- sort(rain_ts, decreasing=FALSE)
    rain_stub$Rainfall <- rain_ts
    return(rain_stub)
  }
}

```

```

# cat(" - Series length is", len, "\n")
# cat(" - Pivot position is", n, "\n")

numLeft <- length(1:n) - 1      #how many values on the left of pivot
numRight <- length(n:len) - 1   #how many values on the right of pivot

if (numLeft < numRight)         #so the minor governs block alternation
{

#Nao precisamos mais dessa biblioteca
#horriavel. TODO: remove-la
#require(schoolmath)

cat(" - Number of left elements is", numLeft, "\n")
cat(" - Number of right elements is", numRight, "\n")

pivot <- rain_ts[1]

rain_ts_no_pivot <- rain_ts[2:len]
len <- (len - 1)

odd_i <- which( is.odd(1:len) )
odd_i <- odd_i[1:numLeft]
even_i <- which( is.even(1:len) )
even_i <- even_i[1:numLeft]

cat(" - Odd indices:", odd_i, "\n")
cat(" - Even indices:", even_i, "\n")

left_rain_ts      <- rain_ts_no_pivot[odd_i]
left_rain_ts      <- sort(left_rain_ts, decreasing=FALSE)
right_rain_ts     <- rain_ts_no_pivot[even_i]

len_left          <- length(left_rain_ts)
len_right         <- length(right_rain_ts)
len_removed <- len_left + len_right

rest_of_rain_ts <- rain_ts_no_pivot[(len_removed+1):len]

```

```

new_rain_ts    <- c(left_rain_ts,pivot,right_rain_ts,rest_of_rain_ts)

cat("--\n")
print(round(rain_ts_no_pivot,2))
print(round(left_rain_ts,2))
print(round(pivot,2))
print(round(right_rain_ts,2))
print(round(rest_of_rain_ts,2))
print(round(new_rain_ts,2))
cat("--\n")

rain_stub$Rainfall <- new_rain_ts
return(rain_stub)
## return(new_rain_ts)

}

else
{
  stop("Half (almost), 3rd, and 4th quartiles not implemented yet!")
}

}

#### Coloca pivot na posicao desejada e
#### efetua ajuste por blocos alternados.
#### p -> posio proporcional, por exemplo, 25%, 50%, etc
BA <- function(p=0.25,ts)
{
  l <- length(ts)
  pivot <- round(l*p/2,0) #na metade de quartil
  cat("Pivot position is: ",pivot,"\n")
}

##essa funcao espera que exista um objeto no workspace
##chamado 'precipitation'
saveIDF <- function(fname)
{

```

```

library(ggplot2)
library(scales)

##gera grafico
the_plot <-
ggplot(precipitation,aes(x=precipitation$Time,y=precipitation$Rainfall)) +
geom_bar(stat="identity") + scale_x_datetime(breaks = "1 hour",
labels=date_format("%H:%M")) + theme(axis.text.x = element_text(angle = 90,
hjust = 0, vjust=0.5)) + xlab("Tempo (h)") + ylab("P (mm/h)")

##salva em pdf
ggsave(filename=fname,plot=the_plot)
}

#converte precipitacao para o
convert2SWMM <- function(p)
{
data.frame(T=format.Date(p$Time, format = "%m/%d/%Y %H:%M:%S",
tz="UTC"),P=round(p$Rainfall,4))
}

```

Anexo E: Patches para a Compilação Correta do engine SWMM 5.1.010

O *engine* utilizado nas simulações foi o SWMM 5.1.010, compilado para Linux (Fedora 21, 64-bit).

O código fonte pode ser baixado do link http://www2.epa.gov/sites/production/files/2015-08/swmm51010_engine.zip.

Para gerarmos o binário *swmm5*, é necessária instalação das ferramentas de compilação do sistema por meio do comando (assumindo uma distro redhat-like):
yum groupinstall "Development tools" -y

Porém, após a descompactação do arquivo *makefiles.zip*, que irá gerar um *Makefile*, são necessárias duas pequenas alterações, sem as quais a compilação não terá êxito.

A primeira alteração é no próprio arquivo ***Makefile***, que está tabulado de forma incorreta, falhando com a mensagem **Makefile:12: *** missing separator. Stop.**

Para a correção desse erro o seguinte *patch* é proposto (note que nesse *patch* também está incluída uma nova seção de *clean* por simples conveniência):

```
--- Makefile      2015-09-13 17:41:39.541547970 -0300
+++ Makefile.new  2015-09-13 17:37:14.559278677 -0300
@@ -9,7 +9,7 @@

swmm5 : $(objs)
-    cc -o swmm5 -fopenmp -lm -lpthread $(objs)
+    cc -o swmm5 -fopenmp -lm -lpthread $(objs)

swmm5.o      : consts.h macros.h enums.h error.h datetime.h objects.h
funcs.h text.h globals.h swmm5.h
climate.o    : headers.h
@@ -64,3 +64,7 @@
treatmnt.o   : headers.h
xsect.o      : headers.h findroot.h

+clean      :
+    rm -fr *.o
+    rm -fr swmm5
```

+

O segundo erro está no arquivo **swmm5.c**, que inclui acidentalmente um cabeçalho que não é necessário (e, na verdade, inexistente no ambiente Linux), causando o seguinte erro durante a compilação: **swmm5.c:65:20: fatal error: direct.h: No such file or directory**

Para a correção desse erro basta removermos a referência a esse *.h*, assim, o seguinte *patch* é proposto:

```
--- swmm5.c 2015-09-13 17:43:27.972021290 -0300
+++ swmm5.c.new 2015-09-13 17:35:18.553911893 -0300
@@ -29,9 +29,9 @@
 // Leave only one of the following 3 lines un-commented,
 // depending on the choice of compilation target
 //*****
-//#define CLE /* Compile as a command line execuTabela */
+//#define CLE /* Compile as a command line execuTabela */
+//#define SOL /* Compile as a shared object library */
-#define DLL /* Compile as a Windows DLL */
+//#define DLL /* Compile as a Windows DLL */

// --- define WINDOWS
#undef WINDOWS
@@ -62,7 +62,7 @@
#endif
////

-#include <direct.h>
+//#include <direct.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
@@ -881,4 +881,4 @@
#endif

//=====
=====
-
\ No newline at end of file
```

+

Note que também nesse último *patch* a opção “*Compile as a command line execuTabela*” foi ativada, enquanto a “*Compile as a Windows DLL*” foi desativada, de acordo com as instruções de compilação do próprio engine (Readme.txt).

Para a aplicação dos *patches* acima é preciso criar, no diretório onde estão os arquivos fonte (.c), um arquivo com o nome *Makefile.patch* contendo o primeiro *patch* e um arquivo com o nome *swmm5.c.patch* contendo o segundo *patch*. Depois, basta aplicá-los com os seguintes comandos:

```
[root@server swmm_engine]$ patch < Makefile.patch
patching file Makefile
[root@server swmm_engine]$ patch < swmm5.c.patch
patching file swmm5.c
```

Após a aplicação dos *patches*, o código está pronto para ser compilado. Portanto, basta compilarmos com o seguinte comando executado a partir, ainda, do diretório onde estão os códigos fonte.

```
[root@server swmm_engine]$ make
cc      -c -o swmm5.o swmm5.c
cc      -c -o climate.o climate.c
cc      -c -o controls.o controls.c
...
```

O resultado final será a geração correta do executável *swmm5*, o *engine* do SWMM, que é o próprio simulador SWMM, tomando como entrada um arquivo .inp, que contém o modelo completo da bacia hidrográfica.