

DANIELLE DE ALMEIDA BRESSIANI

**Hidrologia Urbana: discussão do fenômeno, comparação  
Brasil e EUA e aplicação de modelo a Chicago**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação  
em Engenharia Ambiental da Escola de  
Engenharia de São Carlos -USP para obtenção  
do título de Engenheira Ambiental.

Área de Concentração: Engenharia Ambiental  
Orientador: João Luiz Boccia Brandão

v. 1

São Carlos

2010

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B843h Bressiani, Danielle de Almeida  
Hidrologia urbana : discussão do fenômeno, comparação  
Brasil e EUA e aplicação de modelo a Chicago / Danielle  
de Almeida Bressiani ; orientador João Luiz Boccia  
Brandão. -- São Carlos, 2010.

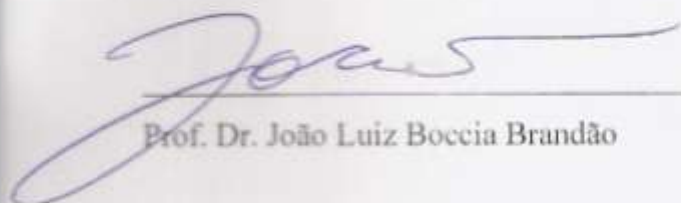
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em  
Engenharia Ambiental) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Hidrologia urbana. 2. Enchentes. 3. Modelo  
hidrológico-hidráulico. I. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Danielle de Almeida Bressiani

Monografia defendida e aprovada em: 26/10/2010 pela Comissão Julgadora:



Prof. Dr. João Luiz Boccia Brandão



Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto



Profa. Dra. Luisa Fernanda Ribeiro Reis



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

“Um passo à frente e você não está mais no mesmo lugar”

Chico Science

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. João Luiz Boccia Brandão pela orientação.

À CAPES/FIPSE, ao Prof. Dr. Edgard Cornachione e ao Renato pela oportunidade de intercâmbio, pelo financiamento e todo o apoio.

Ao Prof. Murugesu Sivapalan, PhD; ao Hongyi Li, PhD; e ao Prof. Arthur Schmidt, PhD pela oportunidade e orientação na Universidade de Illinois em Urbana Champaign - USA.

À todos do Hydro Lab, especialmente ao Josh, Yovanni, Michelli e Andrea pela cooperação e discussões.

Ao Prof. Mencionado pelo apoio e incentivo.

À FAPESP pela bolsa de iniciação científica atual.

Ao CNPq pelo financiamento da minha primeira iniciação científica e à Prof. Assoc. Sarah Feldman pela orientação, e pelo crescimento pessoal e científico, que me proporcionou.

À Universidade de São Paulo, à Escola de Engenharia de São Carlos e à University of Illinois in Urbana-Champaign, pelo excelente suporte e estrutura fornecidos durante a minha graduação e no desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

À todos os docentes do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da EESC-USP, pelo conhecimento e conselhos transmitidos.

À minha família, meus pais e irmã, pelo exemplo e por todo o amor e confiança depositados em mim. Um agradecimento especial a minha mãe, por ter lido e revisado todo este TG.

À Ida e à minha querida grande família dos Estados Unidos por todo o carinho.

À todos os meus amigos, principalmente - Mangá, Amanda, Cana, Paulinha, Pati, Jô e Amina, por estarem sempre perto, mesmo muito longe.

## RESUMO

BRESSIANI, Danielle de Almeida. **Hidrologia Urbana: discussão do fenômeno, comparação Brasil e EUA e aplicação de modelo a Chicago. 2010.** Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

O processo histórico de ocupação do espaço cria sérios problemas que levam a um quadro ambiental atual bastante crítico, no qual se destacam altas taxas demográficas de ocupação, poluição ambiental, deficiência em saneamento básico e inundações. As inundações urbanas resultam em prejuízos de diversas ordens, e na morte de milhares de pessoas por ano. O estudo de bacias urbanas é de grande importância para que este quadro mundial possa ser revertido. No entanto, é necessário buscar melhores e mais precisas previsões acerca dos efeitos da urbanização nas bacias urbanas de drenagem, assim como repensar o planejamento do espaço urbano, sem o que se comprometeriam as próprias soluções previstas para resolver essas questões. Neste trabalho, primeiramente foi realizada uma comparação da hidrologia urbana do Brasil e Estados Unidos. A segunda parte deste trabalho visa estudar a hidrologia urbana dos Estados Unidos; aprender e adaptar um modelo simplificado de hidrologia urbana desenvolvido pela Universidade de Illinois e aplicar este modelo à área Calumet, na cidade de Chicago. A área possui sistema combinado de esgotos e um sistema de túneis e reservatórios subterrâneos, assim como diversos problemas com inundações de ruas, de porões e extravasamento de água combinada aos cursos de água sem o devido tratamento.

Foi possível observar uma correlação entre precipitação e ocorrências de enchentes/extravasamentos (CSOs), tanto pelos registros de CSOs como pelos simulados pelo modelo. O modelo mostrou-se satisfatório, apresentando uma boa análise do efeito global e dos principais eventos de CSOs. Pode ser um bom instrumento para a identificação de problemas, investigação das enchentes urbanas e análise das esferas mais importantes e urgentes a serem alteradas. Estes resultados podem ser úteis no caso de Chicago, que não possui nenhuma quantificação sobre o volume total de água combinada que chega aos corpos de água, dado importante para a qualidade de água dos rios e lago ao entorno da cidade.

Palavras-chave: hidrologia urbana, enchentes, modelo hidrológico-hidráulico

## ABSTRACT

BRESSIANI, Danielle de Almeida. **Urban Hydrology: discussion of the phenomena, comparison of Brasil and USA and application of the model to Chicago**. 2010. Monograph. (Under graduation in Environmental Engineering). School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo. São Carlos, Brazil, 2010.

The historical use of space creates serious problems that lead to a critical environmental framework, in which high demographic rates, environmental pollution, poor sanitation and floods are highlighted. Urban flooding result in loss of many orders and death of thousands of people each year. The study of urban river basins is of great importance to the reversal of this global framework. However, it is necessary to seek better and more precise predictions about the effects of urbanization on the river basins as well as rethink the planning of urban space, without what, the solutions to this matter would be compromised.

At first a comparison of urban hydrology in Brazil and the United States was done. The second part of this work aims to study the urban hydrology of the United States, learn and adapt a simplified model of urban hydrology developed by the University of Illinois and apply this model to the Calumet area in Chicago. The area has a combined sewer system and a underground system of tunnels and reservoir (TARP) as well as various problems with flooding streets, basements and overflows of combined water to the waterways without proper treatment.

It was possible to observe a correlation between rainfall events and combined sewer overflows (CSOs), both by the records of the CSOs as well as the simulated by the model. The model was satisfactory, with a good analysis of the overall effect and the main events of CSOs. It can be a useful tool to identify problems, research on urban flooding and analysis of the most important spheres and urgent to be changed. These results can be useful in the case of Chicago, which has no quantification of the total combined volume of water that reaches the water bodies, important data for the water quality of rivers and the lake surrounding the city.

**Keywords:** urban hydrology, flooding, hydrologic-hydraulics model

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Características de leitos de rios.....	7
Figura 2– Simulação de dois custos acumulados nominais para dois cenários.....	17
Figura 3 – Os Cursos de Água de Chicago.....	25
Figura 4 – Cursos de Água antes e depois da mudança de direção .....	26
Figura 5- Túnel do TARP (Calumet), (a); - Construção de túnel – TARP ( Calumet), (b).....	28
Figura 6 – Sistema de Túneis do TARP e Áreas de Serviço .....	29
Figura 7 – Área de Serviço Calumet .....	31
Figura 8– Sistema TARP Calumet .....	32
Figura 9– Esquema do Sistema Hidrológico .....	35
Figura 10– Sistema hidrológico e TARP.....	36
Figura 11 – Esquema do Sistema Combinado de Águas e Esgotos .....	38
Figura 12–Sistema combinado e TARP .....	39
Figura 13– Esquema de concepção do modelo .....	40
Figura 14– Esquema de funcionamento do sistema e de concepção do modelo.....	40
Figura 15-Uso e Ocupação dos Solos da Área de Calumet.....	49
Figura 16– Postos Pluviométricos da rede do Illinois State Water Survey .....	52
Figura 17 – Curva de Dupla Massa para o posto ISWS 18 .....	53
Figura 18 – Ponto de Estrangulamento (bottleneck) do sistema TARP Calumet .....	57
Figura 19 – Gráfico do funcionamento Hidráulico de uma calha .....	59
Figura 20– Gráfico de Precipitação horária com indicação da ocorrência de CSOs, 2008.....	64
Figura 21 – Relação entre ocorrência de CSO e Volume da Chuva.....	66
Figura 22 - Volume de chuva por duração média de CSO por drop-shaft .....	66
Figura 23 - Pico de Chuva por duração do evento de CSO .....	67
Figura 24 - Pico de chuva por ocorrências de CSO.....	68
Figura 25- Eventos de CSO .....	69
Figura 26 - Precipitação horária 2006 e 2007 .....	72
Figura 27 - CSO III modelados por hora.....	72
Figura 28 - CSOs III Observados .....	73
Figura 29 - Precipitação horária de 2001 a 2006.....	74
Figura 30 – CSO I: Ocorrência e Vazões .....	74
Figura 31 – CSO II: Ocorrência e Vazões .....	75
Figura 32 - CSO III: Ocorrência e Vazões .....	75
Figura 33 – Vazão de Saída do CSS.....	75
Figura 34 – Vazão de Entrada no TARP .....	76
Figura 35 – Variação volumétrica do TARP.....	76
Figura 36 – CSO II com capacidade de transporte do CSS, relativa a 20% da área. ....	77
Figura 37 – CSOs com capacidade máxima de entrada no TARP .....	78



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Histórico Populacional da cidade de Chicago .....	15
Tabela 2– Uso e ocupação do Solo e % Impermeável .....	50
Tabela 3– Área e grau de impermeabilidade das sub-bacias .....	51
Tabela 4 – Área Total e Impermeável .....	51
Tabela 5 – Capacidade de entrada no sistema TARP, por cada drop-shaft.....	56
Tabela 6 - Quantidade de entradas por sub-bacias e estimativa do total.....	60
Tabela 7 – Diâmetros das tubulações do CSS e Vazões calculadas .....	61
Tabela 8 – Coeficientes relativos a variação temporal da carga sanitária .....	63
Tabela 9 - Eventos de CSO em relação a eventos de chuva e drop shafts .....	65

## SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 – OBJETIVOS... ..</b>	<b>6</b>
<b>3 - REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>7</b>
3.1 – INUNDAÇÕES URBANAS .....	7
3.2 – BRASIL E ESTADOS UNIDOS; SÃO CARLOS E CHICAGO .....	10
3.4 – MITIGAÇÕES DOS IMPACTOS DE INUNDAÇÕES URBANAS .....	17
3.5 – SITUAÇÃO ATUAL – BRASIL E EUA .....	21
<b>4 - METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
4.1 – ÁREA DE ESTUDO .....	24
4.1.1 – Os Cursos de Água de Chicago.....	24
4.1.2 - Plano de Túneis e Reservatório - TARP (Tunnel and Reservoir Plan) .....	26
4.1.3 – Calumet .....	30
4.2 – MODELAGEM .....	32
4.2.1 – Modelos Hidrológicos .....	32
4.2.2 – Modelagem de Bacias Hidrográficas Urbanas .....	33
4.2.3 - Matlab .....	36
4.3 – O MODELO .....	37
4.3.1 - Intercepção na cobertura vegetal e em depressões superficiais .....	41
4.3.2 - Processos nas áreas impermeáveis.....	41
4.3.3 - Processos nas áreas permeáveis .....	42
4.3.4 - Processos Relativos ao Sistema Combinado de Esgotos .....	44
4.3.5 - Processos relacionados ao TARP e Estação de Tratamento .....	46
<b>5 - ANÁLISE DE DADOS .....</b>	<b>49</b>
5.1 - USO E OCUPAÇÃO DO SOLO .....	49
5.2 - PRECIPITAÇÃO .....	52
5.3 - EVAPORAÇÃO .....	53
5.4 – TARP.....	54
5.4.1 – Capacidade de Armazenamento .....	54
5.4.2 - Capacidade de entrada e transporte .....	54
5.5 – CAPACIDADE DO SISTEMA COMBINADO DE ESGOTOS – CSS.....	57
5.5.1 – Capacidade de Entrada .....	57
5.5.2 – Capacidade de Transporte .....	60
5.6 – ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DO SISTEMA COMBINADO .....	62
5.7 – FLUXO SANITÁRIO.....	62
5.8 – RELAÇÃO ENTRE CSOs E PRECIPITAÇÃO, 2008 .....	63
<b>6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>70</b>
<b>7 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
<b>8 - BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>80</b>
<b>Anexo 1 – Resultados do Modelo para os Anos Hidrológicos de 2001 a 2006 .....</b>	<b>84</b>

## 1 - INTRODUÇÃO

Desde o início das civilizações, água tem sido uma questão central. As primeiras civilizações se instalavam nas proximidades dos rios, como no caso do rio Nilo, e começavam a se desenvolver a partir do uso desta água na agricultura. Autores, como Caponera (1992, apud JASPERS, 2003) definiram os primeiros agrupamentos sociais desenvolvidos como civilizações hidráulicas.

O crescimento populacional e a elevação do padrão de vida criam um aumento na demanda da água. Os recursos hídricos vem sendo utilizados de forma intensa e muitos sistemas já excederam o nível sustentável de uso da água. Com os altos índices de poluição, e com os efeitos do aquecimento global, as situações de disponibilidade de água e de ocorrência de enchentes se tornam assuntos ainda mais delicados.

A água é necessária para diversos usos, como, para a agricultura, suprimento de áreas urbanas e industriais, recreação, transporte, geração de energia, assim como, para a manutenção dos ecossistemas, entre outros. Com o aumento da urbanização, a demanda de água para cidades e indústrias está aumentando, e a competição pela água é ainda mais complicada quando problemas sociais estão envolvidos (especialmente em países em desenvolvimento), onde equidade de acesso à água e segurança alimentar são objetivos primordiais (SAKTHIVADIVEL & MOLDEN, 1999).

Os problemas na gestão da água têm apenas aumentado, enfrentando conflitos entre montante e jusante de bacias; aumento de enchentes e de desastres de ordem ambiental; pobreza, poluição e escassez da água. Ainda há milhões de pessoas que não dispõem da quantidade de água necessária para o uso doméstico, e é provável que metade da população mundial não conte com a quantia adequada de água para higiene e saneamento básico (SULLIVAN, 2002).

O processo histórico de ocupação gera sérios problemas, em que ocorre altas taxas demográficas, poluição, deficiência no saneamento básico, enchentes e secas. Entre 1985 e 1999, as inundações foram responsáveis por 53% das mortes causadas por catástrofes naturais no mundo, o que corresponde a cerca de 302 mil mortes. Nesse mesmo período, estima-se que os prejuízos causados pelas inundações sejam equivalentes a US\$275 bilhões (BERZ, 2000).

A América Latina foi a terceira região do mundo com o maior número de inundações entre 1973 e 2002, tendo registrado cerca de 240 eventos. No Brasil, os prejuízos anuais são superiores a US\$ 1 bilhão (MCT/CGE, 2002). Entre janeiro e março de 2004, as inundações atingiram mais de 1.220 municípios brasileiros destruindo totalmente 17.510 casas, danificando outras 95 mil casas, atingindo perto de 377 mil pessoas (FGTS, 2004), e gerando perdas estimadas em US\$3,5 bilhões (NIBH, 2004). O Brasil está entre os 18 países que possuem perdas superiores a US\$18 bilhões, devido a inundações, e entre os 14 países com prejuízo potencial, devido a enchentes, superior a 5% do PIB (MENDIONDO, 2005). As enchentes no mês de Junho deste ano, 2010, no Nordeste brasileiro evidenciam a fragilidade da área e a suscetibilidade do Brasil à enchentes urbanas; as enchentes atingiram cerca de 90 municípios de Alagoas e Pernambuco; mais de 150.000 pessoas tiveram que deixar suas casas e mais de 50 pessoas morreram.

Os Estados Unidos também sofrem fortemente com problemas de inundações, assim como outros problemas de ordem climática, como, tornados, furacões e ciclones. As perdas econômicas dos Estados Unidos durante uma seca intensa entre 1987 e 1989 excederam US\$39 bilhões, e as enchentes de 1993 causaram perdas estimadas de US\$15 a 20 bilhões (OTA 1993; NOAA 2002). O National Weather Service (NWS-Serviço Nacional do Clima) estima que, durante a década de 90, as enchentes causaram perdas de aproximadamente US\$50 bilhões aos Estados Unidos (NWS apud DOWNTOWN at all, 2005). No estado da

Califórnia, em 1998, as perdas excederam US\$2bilhões (DOWNTOWN et al, 2005). Em relação às outras interferências climáticas, os valores também são muito elevados, pode-se citar o furacão Katrina, que causou perdas superiores a US\$141 bilhões (BURTON & HICKS, 2005).

Brasil e Estados Unidos tem muito em comum, são países de tamanhos continentais, com diversas diferenças climáticas e culturais; no entanto, os Estados Unidos possuem melhor infra-estrutura e economia mais sólida, e, portanto, os tratamentos aos desastres ambientais diferem muito; a rapidez, preparação e infra-estrutura tornam as perdas menores.

O processo histórico de ocupação do espaço cria sérios problemas que levam a um quadro ambiental atual bastante crítico, no qual se destacam, no Brasil, altas taxas demográficas de ocupação, favelização, poluição ambiental, deficiência em saneamento básico e inundações. Tais problemas são mais significativos nas áreas marginalizadas das cidades, ocupadas pela população de baixo poder aquisitivo, onde a carência de infra-estrutura básica tem como resultado um grau elevado de vulnerabilidade ambiental. No Brasil, as diferenças sociais são muito acentuadas, existindo também carência por infra-estrutura em muitos locais; nos Estados Unidos a disparidade social é menor, mas também ocorre, e problemas similares aparecem, em menor escala, mas, continuam a ser mais críticos nas partes marginalizadas da sociedade.

As inundações urbanas resultam em prejuízos de diversas ordens, e na morte de milhares de pessoas por ano. Ocorrem também outras perdas bastante relevantes, como, destruição, ou danificação de bens materiais, interrupção da atividade econômica e social, contaminação por doenças de veiculação hídrica, assim como, contaminação da água, dentre outras.

Muitas cidades brasileiras possuem ligações clandestinas de esgoto com o sistema de drenagem pluvial, assim como rios poluídos atravessando as cidades, ocasionando, quando ocorrem inundações, contato direto da população com a água contaminada, agravando, com isso, ainda mais as conseqüências das enchentes. Nos Estados Unidos há em diversas cidades o sistema de drenagem combinado de esgoto e água da chuva; em eventos precipitação intensa, a capacidade do sistema combinado é excedida, e as águas servidas e da chuva ocasionam enchentes, às vezes nas ruas, como fluxo de retorno às casas/porões, ou mesmo direto aos rios e lagos; causando preocupações em relação à qualidade da água e doenças.

A freqüente ocorrência de inundações em várias cidades mostra a necessidade de reflexão sobre o histórico da expansão urbana, que resulta em grandes alterações no uso e ocupação do solo, gerando crescente impermeabilização, ocupação de fundos de vale e de áreas alagáveis de rios e de córregos urbanos, que causam interferências significativas nas respostas hidrológicas da área, destacando-se a diminuição da infiltração e do armazenamento de água, e conseqüente aumento do escoamento superficial (MENDES, 2005).

O estudo de bacias urbanas é de grande importância para que este quadro mundial possa ser revertido. No entanto, é necessário buscar melhores e mais precisas previsões acerca dos efeitos da urbanização nas bacias urbanas de drenagem, assim como repensar o planejamento do espaço urbano, sem o que se comprometeriam as próprias soluções previstas para resolver essas questões.

Um futuro uso deste trabalho tem como iniciativa apoiar as bases legais brasileiras; a Lei número 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos; a Lei Nº 11.445, de 5 de Janeiro de 2007, que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e a Lei Nº 12.187, de 29 de Dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima.

Bases que precisam adaptar critérios de convergência com base nos seguintes condicionantes: um que englobe uma visão de indicadores de longo prazo em Termos de Referência e Licenciamentos de Obras e Infraestruturas, especialmente para instrumentos de outorga, cobrança, enquadramento e planos de bacia; e o relacionamento destes instrumentos com a previsão e estudo de enchentes em bacias urbanas com poucos dados e/ou dados escassos (realidade na maioria das bacias hidrográficas brasileiras), de forma a estabelecer uma gestão e políticas sustentáveis dos recursos hídricos, e proporcionar que os hidrologistas possam ir além das resoluções imediatas de problemas urgentes, ou de obras de engenharia e hidráulica, mas da procura por novas e inovadoras soluções para o problema de enchentes urbanas e visando obter um melhor entendimento dos processos de hidrologia urbana (SIVAPALAN et al, 2003).

Desta forma, sendo fundamental um melhor e maior monitoramento quali-quantitativo e socioeconômico das cheias urbanas, que atualmente são muito pouco monitoradas de forma sistemática, ligando-as a sistemas de alertas e planejamento do espaço urbano.

## **2 - OBJETIVOS**

Os objetivos deste trabalho foram relativos à primeira e segunda fases de uma pesquisa de três fases, que visa contribuir para a um novo olhar do quadro de enchentes da cidade de São Carlos e visa o estudo de uma área na cidade de Chicago, Illinois, Estados Unidos, buscando uma análise de cheias nas bacias urbanas das cidades, para fornecer subsídios para o planejamento urbano. A primeira parte do trabalho visa comparar a hidrologia urbana no Brasil e nos Estados Unidos.

A segunda parte deste trabalho visa estudar a hidrologia urbana dos Estados Unidos; aprender e adaptar um modelo simplificado de hidrologia urbana desenvolvido pela Universidade de Illinois e aplicar este modelo à cidade de Chicago. Analisar a viabilidade de utilização deste modelo para situações reais, assim como analisar a viabilidade de aplicação da concepção do modelo à realidade brasileira e com o enfoque no planejamento urbano.



### 3 - REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 – INUNDAÇÕES URBANAS

De acordo com Tucci & Bertoni (2003) o escoamento pluvial pode produzir inundações de áreas ribeirinhas e inundações devido à urbanização, os dois processos podem ocorrer isoladamente, ou em conjunto. Os rios possuem dois leitos; um menor, por onde a água escoava normalmente, e outro maior, que é inundado em média a cada 1,5 a 2 anos (**Figura 1**). As inundações ribeirinhas são inundações naturais que ocorrem no leito maior dos rios por causa da variabilidade temporal e espacial da precipitação e do escoamento na bacia hidrográfica.

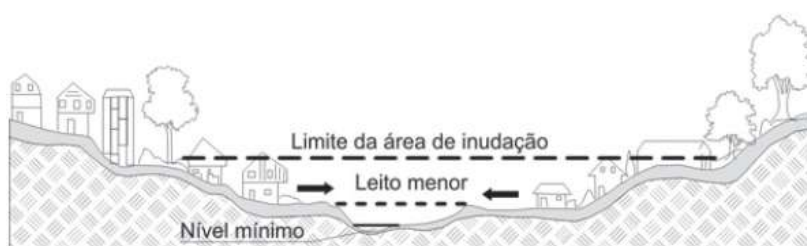


Figura 1- Características de leitos de rios.

Fonte: Tucci (2008)

Os impactos sobre a população são causados pela ocupação inadequada do espaço urbano. Isto decorre do fato de o plano diretor urbano da quase totalidade das cidades da América do Sul não possuir restrições quanto ao loteamento das áreas de risco de inundação. Alguns anos sem enchentes é razão suficiente para que sejam loteadas áreas inadequadamente. Ocorre também nas cidades sul americanas, a ocupação ilegal de áreas ribeirinhas de domínio público pela população de baixo poder aquisitivo (TUCCI & BERTONI, 2003). Nos Estados Unidos, o controle sobre as terras do Estado, assim como o planejamento urbano com restrições, de acordo com os mapas das áreas de risco de

inundações, são efetuados e, desta forma, as enchentes são, normalmente, devido à urbanização.

As inundações devido ao desenvolvimento urbano ocorrem em função da remoção da vegetação, da impermeabilização e ocupação do solo e da construção de redes de condutos pluviais, canalização ou obstruções do escoamento, que aceleram e aumentam a quantidade de água que chega ao mesmo tempo no sistema de drenagem, produzindo inundações mais frequentes (KONRAD, 2003 e TUCCI & BERTONI, 2003).

A urbanização altera o uso e a ocupação do solo, interferindo nas respostas hidrológicas das bacias hidrográficas, destacando-se a diminuição da infiltração e do armazenamento de água e conseqüente aumento da vazão e volume do escoamento superficial (GALSTER et al, 2006). Muitos estudos relatam impactos hidrológicos da urbanização em escala temporal e espacial, e estes impactos afetam diversos aspectos do meio, por erosão e alargamento dos rios, perda de *habitats* de espécies ribeirinhas e de áreas alagáveis, diminuindo a população das comunidades aquáticas, reduzindo a diversidade ecológica, podendo afetar a saúde e a qualidade de vida dos homens (BHADURI et al, 2001).

Segundo TUCCI & BERTONI (2003), em 1800, apenas 1% da população mundial vivia em cidades, no entanto, desde meados do século XIX, como efeito associado à revolução industrial, a urbanização cresce em um ritmo cada vez mais acelerado. Atualmente, a população mundial é de cerca de 6,6 bilhões de habitantes, e a população urbana corresponde a cerca de 50% do total. Nos Estados Unidos, 75% da população vive em metrópoles (BHADURI et al, 2001) que ocupam área inferior a 20% da área total do país. O crescimento da população urbana começou devagar, acelerou durante a segunda metade do século XIX, com a revolução industrial, e depois continuou de forma constante nos seguintes cem anos (AUCH et al, 2003). A nova tendência de ocupação no Brasil é o crescimento nas

áreas periféricas, com a população de grandes pólos buscando novas localidades e cidades de médio porte. Essas cidades, de 100 a 500 mil habitantes, começam a sofrer os mesmos processos inadequados de urbanização e impactos ambientais ocorridos nas metrópoles. Consequentemente, as bacias hidrográficas têm sua dinâmica bastante alterada, quando submetidas ao crescimento urbano caótico e acelerado.

Os problemas de drenagem nas cidades são agravados pelo inadequado desenvolvimento de mecanismos de controle e fiscalização. A população carente é a mais atingida, pois reside de maneira informal nos vales de rios, planícies de inundações e encostas de morros. A urbanização da forma que vem ocorrendo impõe a retificação dos cursos fluviais, impermeabilização do solo e destruição da cobertura vegetal, sendo esta responsável pela proteção do solo contra erosão e pelo balanço nos processos de infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial.

O planejamento urbano (quando ocorre) é realizado para a cidade formal, e para a cidade informal são analisadas tendências dessa ocupação. Os principais problemas relacionados à infra-estrutura de água no ambiente urbano são, segundo TUCCI (2008):

- Falta de tratamento de esgoto: grande parte das cidades brasileiras não possui tratamento de esgoto e lança os efluentes na rede de esgotamento pluvial, que escoam pelos rios urbanos;
- Outras cidades optam por implantar as redes de esgotamento sanitário (muitas vezes sem tratamento), mas não implementam a rede de drenagem urbana, sofrendo freqüentes inundações com o aumento da impermeabilização;
- Ocupação do leito de inundação ribeirinha, sofrendo freqüentes inundações;

- Impermeabilização e canalização dos rios urbanos com aumento da vazão de cheia (em até sete vezes) e da sua frequência; aumento da carga de resíduos sólidos sobre os rios próximos das áreas urbanas;
- Deterioração da qualidade da água por falta de tratamento dos efluentes tem criado potenciais riscos ao abastecimento da população em vários cenários, e o mais crítico tem sido a ocupação das áreas de contribuição de reservatórios de abastecimento urbano que, *eutrofizados*, podem produzir riscos à saúde da população.

Existe uma visão limitada do que é a gestão integrada do solo urbano e da sua infraestrutura, e grande parte dos problemas destacados acima é gerada ou agravada pela ineficiência no gerenciamento urbano e pela *setorização* do planejamento. No Brasil, a gestão dos recursos hídricos parte do governo federal e estadual, sendo delegado pelos governos aos Comitês de Bacias, que tem ações regionais para as respectivas bacias. Já nos Estados Unidos a gestão dos recursos é estadual, e há também a criação de comitês, como no caso da Bacia Hidrográfica de Delaware, responsável pelo abastecimento de água de Nova Iorque e Filadélfia, que conta com a participação dos estados envolvidos.

### 3.2 – BRASIL E ESTADOS UNIDOS; SÃO CARLOS E CHICAGO

No Brasil, muitas cidades sofrem pela falta de infra-estrutura e de um planejamento integrado; áreas que não deveriam ser ocupadas o são, apresentando sérios riscos à população, como, por exemplo, áreas de entorno de reservatórios para abastecimento humano, acarretando em carga orgânica que pode comprometer a qualidade da água; ou, por exemplo nas margens de rios poluídos, como nos rios da cidade de São Paulo que possuem situações péssimas e de enorme risco à saúde pública e de funcionamento da cidade quando as enchentes ocorrem.

Nos Estados Unidos, o lançamento de efluentes e a legislação são mais controlados e planejamentos urbanos e zoneamentos são mais restritivos, mas ainda assim diversos problemas ocorrem, como, na bacia do rio Fox, em Illinois, que vem sofrendo severas alterações nas últimas décadas, devido ao aumento excessivo da população e de áreas urbanas de Chicago. O consumo de água e lançamento de efluentes industriais ao rio aumentou muito, este foi colocado na lista de rios em perigo da agência American Rivers em 1999, e alguns estudos mostram perdas na integridade ecológica do rio.

O município de São Carlos localiza-se no centro geográfico do estado de São Paulo. Em 2007, possuía população de aproximadamente 213 mil habitantes (IBGE, 2007), e está inserido em duas grandes bacias hidrográficas: Mogi-Guaçu e Tietê-Jacaré.

A comparação do crescimento demográfico de São Carlos com o estado de São Paulo e do Brasil, no período entre 1981 e 2007, demonstra que o crescimento populacional de São Carlos apresentou taxa geométrica de crescimento superior à média do estado de São Paulo e do Brasil (IBGE, 1981; 2007). A cidade de São Carlos cresceu rapidamente durante o período de 1940 a 2000, a porcentagem da população urbana passou de 53 para 93%, sem um planejamento urbano que acompanhasse adequadamente tal desenvolvimento. Devido à expansão urbana desordenada, a cidade possui diversos problemas ambientais, como erosão, assoreamento, poluição, falta de proteção dos corpos d'água e de drenagem. Assim vem sofrendo com inundações freqüentes em vários pontos da cidade. Situação reforçada pela legislação de uso e ocupação do solo pouco exigente (BOLDRIN, 2005).

A cidade de São Carlos enfrenta freqüentes inundações, que possuem causas distintas. No que diz respeito à região central da cidade, localizada na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, por exemplo, as inundações são consequência da inadequada drenagem do escoamento superficial e da intensa impermeabilização do solo que ocorreu ali. Na parte mais

periférica da cidade, as inundações são causadas pela ocupação indevida das margens dos rios. Nas áreas intermediárias, isto é, nas zonas situadas entre a região central e periférica de São Carlos, as inundações são decorrentes de fatores variados, podendo ocorrer tanto devido à ocupação de áreas ribeirinhas, quanto à urbanização, ou as duas.

Ainda segundo Boldrin (2005), o caso da cidade de São Carlos é alarmante. Estudos realizados pelo NIBH (2004); “Experimento Piloto de Gerenciamento Integrado de Bacias Urbanas para o Plano Diretor de São Carlos, SP”, revelam que a cidade possui mais de 15 sub-bacias urbanas localizadas em áreas de nascentes, com tempos de concentração reduzidos. A cidade apresenta altas perdas econômicas e ambientais, agravadas pela falta de gerenciamento de enchentes; esta sofre, em média, 4 a 5 inundações em um ano, afetando mais de 40 empreendimentos e com perdas da ordem de R\$500.000,00 por enchente. As inundações na área ocorrem muito rapidamente, em menos de 30 minutos, e atingem lâminas d’água que variam entre 50 e 150 cm, causando transtorno à região (MENDES & MENDIONDO, 2007). A cidade de São Carlos sofre inundações desde 1940, no entanto este fato não foi levado em conta no seu desenvolvimento (MENDES, 2005). A região foi bastante urbanizada e impermeabilizada, com o surgimento de áreas residenciais, industriais e comerciais, e ampliação do sistema viário, implicando no aumento da frequência dos eventos.

A urbanização nos Estados Unidos não ocorreu de forma tão acelerada, no entanto o país também sofreu rápido crescimento urbano, provocado principalmente pela revolução industrial, ocasionando inundações frequentes em várias regiões do país. No entanto, os dois países diferem muito a respeito do sistema de gestão hídrica, gerenciamento de risco e infraestrutura.

Em agosto de 2007, no centro-oeste dos Estados Unidos, uma inundação de grandes proporções causou danos a milhares de casas e foi responsável por pelo menos 17 mortes; os

estados de Ohio, Wisconsin, Minnesota e Illinois foram afetados. O rio Fox teve seu nível de água superior ao já visto em cinquenta anos, no entanto as enchentes foram antecipadas pelo sistema de alerta estadual e nacional. Em alguns locais, a água chegou a níveis recordes, excedendo níveis de barragens de 4,5 a 5 metros. Por volta de 600 residências foram deslocadas. O estado de Illinois declarou quatro municípios em estado de emergência, facilitando desta forma o auxílio federal (FEMA apud Fox News, 2007).

Chicago é a maior cidade do estado de Illinois e do centro-oeste americano e a terceira cidade mais populosa dos Estados Unidos. Possui mais de 2,8 milhões de habitantes vivendo dentro dos limites da cidade e cerca de 9,7 milhões na região metropolitana. Chicago está localizada em sua maioria no condado Cook, com a exceção da parte da cidade próxima ao O'Hare International Airport que se localiza no condado DuPage. A cidade nasceu e se tornou o maior centro de telecomunicações e transporte dos EUA. Atualmente, a cidade mantém seu status de importante pólo de indústria e infra-estrutura, com o aeroporto internacional de O'Hare sendo o segundo aeroporto mais movimentado do mundo. A cidade é também centro de negócios e finanças, estando entre os 10 centros financeiros mundiais.

A cidade foi fundada em 1836 entre o Lago Michigan e o sistema de rios Illinois-Mississippi. Chicago cresceu ao nível de uma metrópole em 1890 (AUCH et al, 2003). Chicago se localiza na parte nordeste de Illinois, na ponta sudoeste do Lago Michigan. A cidade fica ao lado do lago Michigan, e de dois rios; o Rio Chicago na parte central e do Rio Calumet, na parte sul industrial. O canal Sanitário e de navegação de Chicago (Chicago Sanitary and Ship Canal) liga os Grandes Lagos, pelo Rio Chicago com o Rio Mississippi, pelo Rio Des Plaines, que corre a oeste da cidade.

A história e economia da cidade estão intimamente ligadas à sua proximidade do Lago Michigan. O lago também fornece um efeito positivo, a moderação do clima de

Chicago, bairros ribeirinhos são um pouco mais quentes no inverno e mais frescos no verão. Portanto, desde o início da cidade a questão dos recursos hídricos é um assunto importante, no entanto, estudos mostram que nos últimos 40 anos houve um aumento significativo de tempestades, em extensão e frequência. Este aumento foi destacado em 2001, quando foi medido o maior número de tempestades na sua história (CANTONE, 2007).

A cidade de Chicago em seus primeiros cem anos apresentou altas taxas de crescimento (dentre as maiores do mundo), em 40 anos a cidade passou de uma população inferior a 30.000 para acima de 1 milhão, em 1890. A **Tabela 1** possibilita uma melhor compreensão do crescimento da cidade. Chicago atingiu seu maior contingente populacional em 1950, de 3,6 milhões de pessoas. De acordo com o Censo de 2000, havia 2.896.016 residentes, 1.061.928 casas e 632.558 famílias, a renda média anual para uma casa na cidade era de 38.625 dólares. A população de sexo masculino possuía renda média anual de U\$ 35.907 contra U\$ 30.536 do feminino. Cerca de 16,6% das famílias e 19,6% da população viviam abaixo da linha da pobreza (CENSUS, 2000).

Inundações são problema em diversas cidades de grande porte nos Estados Unidos, e são comuns à Chicago. Como consequência de chuvas intensas ocorrem inundações de ruas, viadutos e de porões de estabelecimentos e residências, um problema frequente. O tráfego de veículos, incluindo os sistemas de ônibus e trens, é interrompido (CHANGNON, 1996 apud CHANGNON and WESTCOTT, 2002).



<b>Censu</b>	<b>População</b>	<b>Porcentagem de Crescimento %</b>
1840	4.470	—
1850	29.963	570.3%
1860	112.172	274.4%
1870	298.977	166.5%
1880	503.185	68.3%
1890	1.099.850	118.6%
1900	1.698.575	54.4%
1910	2.185.283	28.7%
1920	2.701.705	23.6%
1930	3.376.438	25.0%
1940	3.396.808	0.6%
1950	3.620.962	6.6%
1960	3.550.404	-1.9%
1970	3.366.957	-5.2%
1980	3.005.072	-10.7%
1990	2.783.726	-7.4%
2000	2.896.016	4.0%
Estimativa 2009	2.851.268	-1.5%

Tabela 1- Histórico Populacional da cidade de Chicago

As chuvas intensas estão normalmente associadas à trovoadas, resultando em raios e ventos fortes, que frequentemente interrompem o sistema de eletricidade. Chicago possui o sistema combinado de esgotos e água da chuva, como já discutido, e quando chuvas intensas ocorrem, para reduzir a ocorrência de enchentes, água poluída é direcionada ao Lago Michigan. O problema de enchentes na cidade é superior à maioria das outras cidades americanas. Para diminuir os efeitos das enchentes um sistema de túneis profundos foi construído; programa caro, com a instalação de reservatórios subterrâneos com alta capacidade de armazenamento. Desta forma, quando chuvas intensas ocorrem, o fluxo é direcionado a estes túneis e a água é armazenada nos reservatórios, quando o nível dos rios retorna ao normal, esta é bombeada às estações de tratamento. Um sistema “bloqueador de

chuvas”, com custo de US\$75 milhões, também foi instalado para reduzir enchentes nos porões (CHANGNON and WESTCOTT, 2002).

Em 2001, oito episódios de chuvas intensas ocorreram, seis produziram enchentes pequenas, destacando a eficiência do sistema implantado, e duas produziram enchentes críticas, onde mais de 300.000 porões foram inundados (Changnon and Westcott, 2002). Chicago tem tido problemas de inundação de grande ordem, mas como pode ser visto, imensos incentivos e infra-estrutura foram alocados para minimizar os efeitos das enchentes.

Johnston et al, 2006, realizaram estudo em uma área na região oeste da cidade de Chicago, para o qual foram calculadas as perdas causadas por enchentes em estruturas e interiores. A área de estudo foi a bacia do Blackberry Creek que drena uma área de 189 km<sup>2</sup>, que correspondia a uma bacia em urbanização. Este estudo baseou-se no método de curvas de fase de dano utilizado pelo U.S. Army Corps of Engineers. O estudo foi realizado para uma chuva de probabilidade anual de 0,01 para dois cenários, um convencional, seguindo o padrão de desenvolvimento, e outro *conservacionista*, com a implantação de medidas de boas práticas de gestão/manejo na área a montante da bacia. Os prejuízos encontrados para o cenário de desenvolvimento foram de US\$6,78/m<sup>2</sup> para casas de dois andares, e para casas de um andar, o valor obtido foi de US\$9,98/m<sup>2</sup>. Considerando que a média de moradores por casa é de quatro pessoas, estes valores vão respectivamente para US\$1,70/m<sup>2</sup>\*hab e US\$2,50/m<sup>2</sup>\*hab. Seguindo o mesmo padrão de quatro habitantes, no cenário conservacionista as perdas variam entre US\$1,27/m<sup>2</sup>\*hab e US\$1,89/m<sup>2</sup>\*hab.

Mendiondo, 2005 e 2010, efetuou estudo similar para a bacia hidrográfica do Gregório, na área central da cidade de São Carlos; a bacia possui 13Km<sup>2</sup>, numa área urbanizada da cidade, onde simulações foram realizadas para os riscos em dois cenários, um reativo e um pró-ativo, cenário que inclui a utilização de sistemas de alerta anterior a cheias,

zoneamento das áreas dos leitos de inundação e seguro para transferência de risco. Um período de cinquenta anos foi analisado, de 2000 a 2050, sendo possível observar na **Figura 2** que o cenário pró-ativo possui uma resiliência muito superior ao reativo; os custos acumulados para enchentes médias, com período de retorno superiores a 20 anos ( $T^*>20$ ), são cerca de dez vezes superiores para o cenário reativo e para enchentes superiores a  $T^*>500$ , os custos superam em 100 vezes os do cenário pró-ativo.

Como pode ser observado, os custos atuais de risco em Chicago são inferiores aos custos em São Carlos, isso por se tratar de uma situação, que, mesmo que delicada, possui melhor infra-estrutura, assim como já existe o sistema de alarme pré-enchentes, zoneamento de áreas alagáveis e seguro. No entanto, o cenário pró-ativo apresentado por Mendiando (2010) demonstra uma grande oportunidade, além de apresentar enormes vantagens.

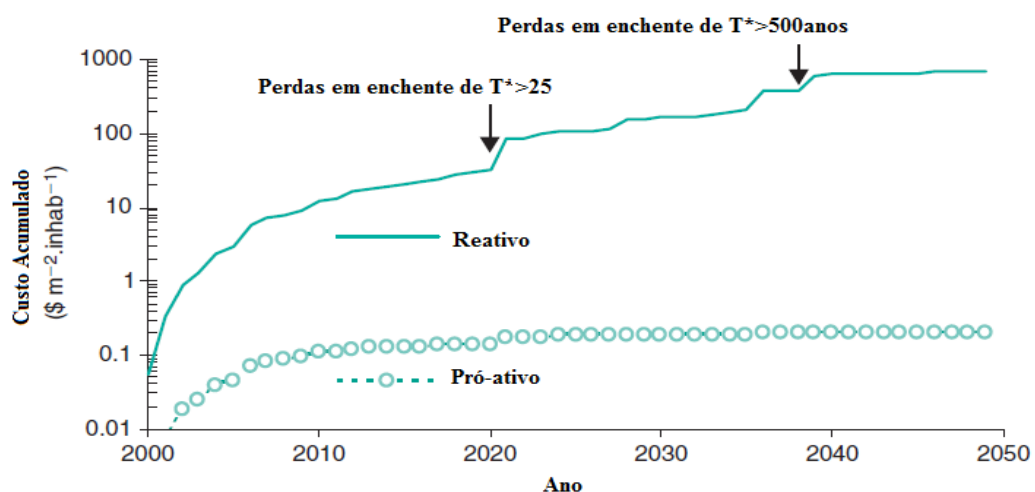


Figura 2– Simulação de dois custos acumulados nominais para dois cenários

Fonte: Mendiando (2010)

### 3.4 – MITIGAÇÕES DOS IMPACTOS DE INUNDAÇÕES URBANAS

O controle de cheias urbanas deve ocorrer de forma contínua, através de um processo permanente, que deve ser mantido pela sociedade, de forma a reduzir custos econômicos,

sociais e ambientais dos impactos. Este controle vem sendo realizado por meio de obras hidráulicas isoladas em diversos países da América do Sul, no entanto, estas, de forma isolada, não se mostram suficientes, muitas vezes só transferindo o problema para a jusante. O controle deve partir de um planejamento urbano integrado, em que a cidade é tratada como um sistema e todos os fatores ambientais são levados em consideração. Tucci e Genz (1995) afirmam que os seguintes princípios básicos devem ser apresentados para a construção de um programa de drenagem urbana efetivo:

- Estudar a bacia como um sistema;
- As diversas medidas de controle a serem tomadas devem ser analisadas em conjunto;
- Os meios que garantem suporte ao programa são a legislação e o plano diretor;
- Horizontes de expansão: a dinâmica da cidade exige planejamento das áreas a serem desenvolvidas e *densificação* das existentes;
- O critério fundamental de projeto é não ampliar a cheia natural;
- O controle é contínuo, permanente;
- A formação dos profissionais envolvidos em drenagem urbana deve ser orientada para o planejamento;
- A manutenção e o controle do processo são realizados pelas administrações locais;
- As normas brasileiras de drenagem urbana devem ser atualizadas à luz de uma nova filosofia de gerenciamento de bacias urbanas.

As medidas de controle da inundação podem ser do tipo estrutural e não estrutural. As medidas estruturais modificam o sistema fluvial evitando os prejuízos decorrentes de enchentes; são obras de engenharia que visam reduzir o risco de enchentes; essas medidas podem ser de caráter intensivo ou extensivo. Medidas extensivas são aquelas que agem na

bacia, procurando modificar as relações entre precipitação-vazão, como o aumento da cobertura vegetal do solo, que reduz e retarda os picos de enchentes e controla a erosão da bacia. As medidas intensivas são aquelas que agem no curso da água e podem ser de três tipos (SIMONS et al., 1977 apud TUCCI e BERTONI, 2003): a) aceleram o escoamento: construção de diques e polders, aumento da capacidade de descarga dos rios e corte de meandros; b) retardam o escoamento: reservatórios e bacias de amortecimento; c) desvio do escoamento, obras como canais de desvio.

As medidas não estruturais são aquelas em que os prejuízos são reduzidos pela melhor convivência da população com as enchentes (TUCCI e BERTONI, 2003). As medidas estruturais não visam dar completa proteção contra a maior enchente possível, pois, isto normalmente é física e economicamente inviável. As medidas não estruturais quando combinadas às estruturais podem minimizar significativamente o prejuízo das enchentes com um custo menor. As medidas não estruturais buscam a redução dos danos das inundações pela introdução de normas, regulamentos e programas de disciplinamento do uso e ocupação do solo, podendo ser classificadas em: zoneamento de áreas de inundação através de regulamentação do uso do solo, construção à prova de enchentes, seguro para enchentes, previsão e alerta de inundação.

Ainda, segundo Tucci e Bertoni (2003), é ingenuidade do homem imaginar que poderá controlar totalmente as inundações; as medidas visam sempre minimizar suas conseqüências. O controle de inundações deve ocorrer pelo conjunto de medidas estruturais e não estruturais, permitindo à população minimizar suas perdas e viver de forma harmônica com o rio. A busca pela combinação perfeita entre as duas vertentes de medidas constitui o planejamento urbano de proteção contra as inundações.

No Brasil, assim como na maioria dos países no mundo, atualmente, utilizam-se mais medidas de ordem estrutural e de controle e emergência após enchentes. De acordo com a Divisão de Ciências Básicas e Engenharia da UNESCO, para cada U\$100 gastos pela comunidade internacional com riscos e desastres, U\$96 vão para contenção de situações de emergência e reconstrução, e apenas U\$4 vão para prevenção. Ainda que cada dólar gasto em prevenção reduza as perdas em U\$25 (MENDIONDO, 2008).

Em países em desenvolvimento, a necessidade por infra-estrutura ainda existe, mas na maioria dos países desenvolvidos esta não é mais a realidade. As instituições precisam mudar o foco de desenvolvimento e infra-estrutura sempre, para um melhor planejamento e gestão de riscos. No Brasil, em alguns locais há muitas obras de engenharia, como os diversos *piscinões* da cidade de São Paulo. No entanto, como dito anteriormente, sem o devido planejamento integrado estas estruturas não conseguem conter as enchentes sozinhas. No Brasil, utilizam-se muitos reservatórios e *piscinões*. Já nos Estados Unidos, além de reservatórios, são também utilizados diques entre os rios e as cidades, algo não muito comum no Brasil.

Para uma boa gestão de bacias hidrográficas e prevenção de desastres hidrológicos, o estudo entre uso e ocupação do solo, e recursos hídricos, faz-se essencial, assim como a integração das limitações naturais, as demandas sociais e econômicas e os processos legais, políticos e administrativos. É necessário executar uma gestão superficial e sub-superficial da água, em qualidade, quantidade e sob os aspectos ambientais de forma multidisciplinar e participativa (JASPERS, 2003). Uma estrutura integrada para o entendimento das complexidades entre as interações naturais e humanas é urgente e prioritária (LIU et al, 2007).

É necessário utilizar uma nova abordagem; sendo urgente a inclusão de melhores medidas de manejo e de planejamento, com a utilização combinada de medidas estruturais, com não estruturais, contabilizando incertezas e sustentabilidade. Uma gestão sustentável é necessária, uma que inclua o uso de menos recursos naturais, medidas locais de infiltração, controle na fonte a montante, bacias de retenção, além de um novo conceito de arquitetura e engenharia; mais verde em oposição a estruturas de concreto, que muitas vezes, apenas transferem o problema a jusante; de forma a remover inconsistências, irracionalidades e custosas obras isoladas de engenharia (HARREMOES, 2002).

Alguns passos para prevenção de riscos são: análise e avaliação de riscos de enchentes, gestão e suporte de informação, sistemas para diagnósticos urbanos, planejamento participativo e gestão adaptativa dos recursos hídricos, incorporação da gestão de risco de cheias na gestão urbana, e gestão sustentável de risco de enchentes (MENDIONDO, 2008).

### 3.5 – SITUAÇÃO ATUAL – BRASIL E EUA

Os Estados Unidos possuem um bom sistema de gestão de risco de cheias, mas em países em desenvolvimento, como o Brasil, este assunto ainda é um desafio. Os Estados Unidos possuem uma boa estrutura, com menor disparidade social, mais verba governamental. O país sofreu crescimento urbano menos acelerado, além de existirem restrições de zoneamento, planejamento urbano e legislação que são levados a risca, havendo também um sistema elaborado de alarme de enchentes e de seguro.

No Brasil, assim como em muitos países em desenvolvimento, a população acostumou-se com a tragédia, e em ver a tragédia com pouca atenção na mídia. Além disso não há seguros contra enchentes, e os governos trabalham com recursos limitados, que, em alguns casos, se tornam ainda mais restritos devido à corrupção.

A maioria (quase totalidade) das cidades brasileiras não possui zonemanento ou planejamento de risco de enchentes no plano diretor, ou nas leis de zoneamento. As áreas de maior risco de enchentes são ocupadas pela população de baixo poder aquisitivo, e sem opção. Esta população é a mais prejudicada quando as enchentes ocorrem.

Nos Estados Unidos, há leis de zoneamento, que consideram os leitos de rios e enchentes, e estas leis são estritas e muito exigentes. Governos locais possuem a opção de participar do Programa Nacional de Seguro contra Enchentes (National Flood Insurance Program-NFIP) para assegurar a gestão correta de cheias. Estados, desta forma, são elegíveis a ajuda federal em caso de estados de emergência após enchentes, também há diversos tipos de incentivos para que os padrões de segurança não sejam excedidos. Em países em desenvolvimento, o seguro não é uma opção, e a população precisa arcar com os custos sozinha, com uma ajuda governamental normalmente incerta, ineficiente e demorada (MENDIONDO, 2010). Enquanto que em países desenvolvidos, companhias de seguro têm que encontrar maneiras de lidar com perdas recordes, países pobres precisam de micro-seguro para prover à população pelo menos um valor mínimo de segurança financeira no caso de enchentes devastadoras (KRON, 2009).

A necessidade de melhoria na gestão de enchentes urbanas no mundo inteiro é clara. Também é clara a diferença entre países como o Brasil e os Estados Unidos nesse aspecto. As duas situações são complexas e distintas, no entanto, nos dois países o problema de enchentes urbanas se mostra como uma grande preocupação. Para resolver estes problemas a pesquisa de bacias hidrográficas urbanas é necessária, é preciso buscar melhores e mais precisas previsões sobre os efeitos da urbanização nos recursos hídricos, no entanto essa questão clama por uma mudança de comportamento, de pensamento e de política governamental.



O problema de inundações urbanas no Brasil é muito complexo, inclui diversos setores, articulações e diferentes dinâmicas de poder. Os problemas ambientais ocorrem como consequência de uma perspectiva política, de uma marginalidade social e da falta de planejamento. O quadro de disparidade social no Brasil é preocupante, e os recursos ambientais são explorados sem o devido controle ou planejamento, desta forma é difícil discutir isoladamente o problema ambiental, pois o planejamento ambiental não é feito de forma antecipada, como deveria, mas após a tomada de decisões, e olhado apenas no final da cadeia, como uma possibilidade de mitigações dos efeitos. Esta dinâmica necessita de mudança urgente. Deve-se realizar o planejamento de forma a realmente planejar, além de tentar mitigar e incorporar a preocupação ambiental aos problemas existentes.

Uma mudança necessária para o Brasil e que precisa ser debatida com urgência e incluída e incorporada nos planos, políticas e ações governamentais, é a mudança da atual tentativa de mitigação de desastres causados por inundações urbanas para uma perspectiva que inclua o desenvolvimento sustentável, educação ambiental visando a futura participação popular, e um planejamento urbano que integre as questões de drenagem urbana e enchentes, utilizando zoneamento ambiental, integração do uso e ocupação do solo e recursos hídricos, e que utilize de boas práticas de manejo (Best Management Practices) e de sistemas de alertas que antecipem as enchentes.

É necessário que o Brasil aprenda com os bons resultados das medidas utilizadas nos Estados Unidos e em outros países, e que busque, por meio de políticas governamentais e ajuda internacional, mudanças na situação atual de enchentes urbanas no país.

## 4 - METODOLOGIA

### 4.1 – ÁREA DE ESTUDO

#### 4.1.1 – Os Cursos de Água de Chicago

O rio Chicago antigamente possuía seu curso em direção ao Lago Michigan, no entanto, o Lago Michigan é a fonte de abastecimento de água da cidade e como o sistema em Chicago é duplo (água pluvial e sanitário), como já discutido, com a ocorrência de chuvas intensas havia o risco de contaminação das águas de abastecimento público pelo arraste das águas combinadas aos pontos de captação no lago, **Figura 3** e **Figura 4**.

Chicago teve algumas epidemias de cólera e problemas com a febre tifóide; em 1849 678 pessoas morreram de cólera, aproximadamente 3% da população. Em 1854, 1.424 pessoas morreram, em 1866 e 1867 também houve epidemias. No final do século 19, a taxa de mortalidade média por febre tifóide era de 65 por 100.000 pessoas por ano, o pior ano foi 1891 quando esta taxa atingiu 174/100.000.

De modo a melhorar os padrões de saúde e a qualidade da água de abastecimento o fluxo do braço principal do rio Chicago foi revertido para drenar água do Lago Michigan, ao invés de fluir a este. Foram construídos o Canal Sanitário e de Navegação de Chicago, entre 1892 e 1900 (Chicago Sanitary and Ship Canal), o Canal Calumet-Sag, 1911-1922 (Calumet-Sag Channel) e o Canal da Costa Norte, 1907-1910 (North Shore Channel) e a construção de comportas na confluência do rio Chicago ao lago Michigan (1933–1938).

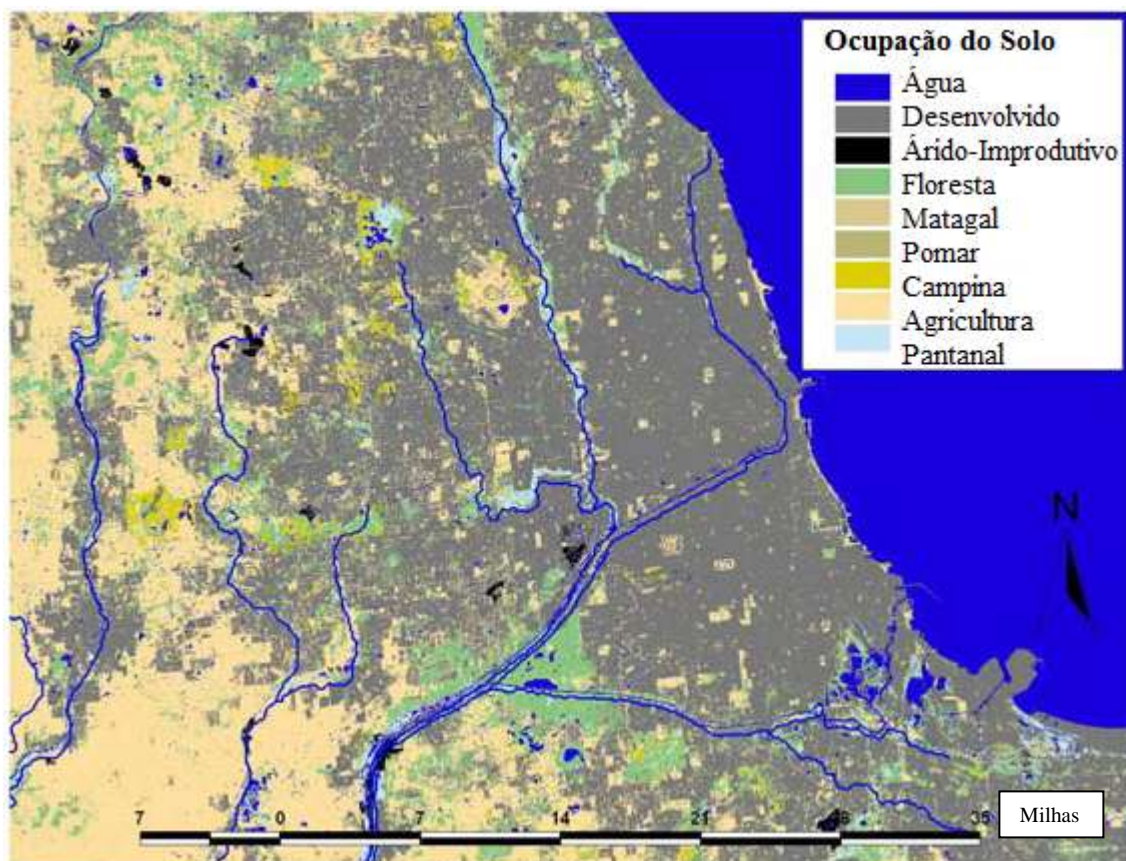


Figura 3 – Os Cursos de Água de Chicago  
( Fonte: Chicago Waterways, 2010)

Os problemas com enchentes cresceram muito após 1938. Como pode ser visto pela **Tabela 1**, apresentada anteriormente, a população cresceu muito nas décadas de 20 e de 30, a partir do desenvolvimento urbano, o que ocasionou aumento da impermeabilização do solo. De acordo com Chicago Waterways (2010), ocorreram enchentes de alta magnitude em 1849, 1855, 1885, 1938, 1952, 1954, 1957, 1961, 1973, 1979, 1986, 1987, 1996, 2007 e 2008, mas as piores foram após 1948.

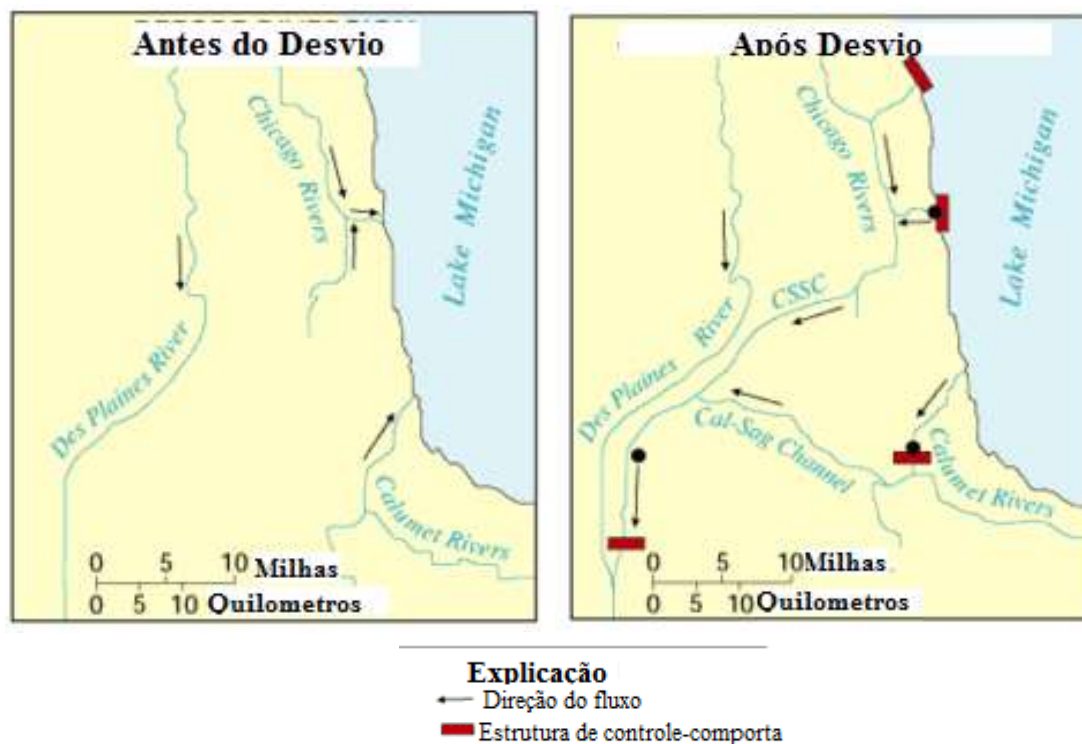


Figura 4 – Cursos de Água antes e depois da mudança de direção

#### 4.1.2 - Plano de Túneis e Reservatório - TARP (Tunnel and Reservoir Plan)

Mesmo com a reversão das águas do rio Chicago, e construção da maior Estação de Tratamento de Esgotos do Mundo, contaminantes continuaram a se acumular nos rios, canais e no Lago Michigan. O problema continuava devido ao fato da cidade possuir um sistema de esgotamento sanitário combinado e ao crescimento urbano e aumento da impermeabilização do solo. Dessa forma, a quantidade de chuva entrando no sistema combinado cresceu de forma significativa.

As redes combinadas e as estações de tratamento não possuíam capacidade para acomodar este fluxo, ocorrendo extravasamentos do sistema combinado (Combined Sewage Overflows – CSOs) mais de 100 dias por ano. Havia dentro da área do sistema combinado de esgotos 600 pontos de descarga que liberavam poluentes ao sistema de águas. Durante chuvas intensas, os rios eram forçados a estabelecer o fluxo natural, carregando esgotos ao Lago

Michigan. O lago, nas proximidades da cidade ficava poluído, com a qualidade de água comprometida para o uso recreacional, perdas da vida aquática e com preocupações em relação à qualidade da água de abastecimento. Além de tudo, o esgoto combinado entrava nos porões das edificações da região.

Em 1967, foi formado o Comitê de Coordenação de Controle de Enchentes (Flood Control Coordinating Committee – FCCC), com membros do Distrito, Estado de Illinois, do condado Cook e da cidade de Chicago para estudar as possibilidades de solução dos problemas de enchentes. Foram estudadas diversas alternativas e foi escolhido o Plano de Túneis e Reservatórios (Tunnel and Reservoir Plan - TARP).

O TARP foi adotado em 1973, como o plano com melhor custo-benefício. É um megaprojeto, um dos maiores projetos de engenharia civil já realizados em termos de escopo, custo e prazo. Ele é gerido pela Metropolitan Water Reclamation District of Greater Chicago (MWRDGC). A previsão de conclusão para a obra completa é para 2019, no entanto as partes mais importantes do sistema já estão em operação. Mais de 3 bilhões de dólares foram gastos no projeto (MWRDGC, 2010).

A primeira fase do TARP foi destinada ao controle de poluição, composta por quatro sistemas de túneis: Mainstream, Des Plaines, Calumet e Upper Des Plaines. Estes sistemas podem ser vistos na **Figura 5**. Após uma tormenta, a água é bombeada dos túneis para as Estações de Tratamento de Esgotos, de acordo com a capacidade disponível, deixando os túneis e reservatórios livres para o próximo evento. O fluxo de esgotos combinados captados é tratado pelas Estações de Tratamento Secundário (MWRDGC, 2010).



Figura 5- Túnel do TARP (Calumet), (a); - Construção de túnel – TARP ( Calumet), (b)

(MWRDGC, 2010)

A construção da fase 1 teve início em 1975, e foi colocada em operação por partes, começando em 1985 e terminando em 2006 – quando toda fase 1 foi posta em operação. O sistema completo possui cerca de 176 Km de túneis de rocha profundos, de grande diâmetro, com capacidade de aproximadamente 8,71 bilhões de litros que, de outra forma, acarretariam em enchentes e descarga direta aos rios e lago, sem tratamento prévio (MWRDGC, 2010).

A segunda fase foi prevista para controle de enchentes, no entanto, ao mesmo tempo protegendo os cursos de água de poluição. São os três reservatórios, que também indicados na **Figura 6** a saber: O'Hare, McCook e Thorton, que quando finalizados terão volume de 66,25 bilhões de litros. O Reservatório de O'Hare com 1.325 milhões de litros, ficou pronto em 1998 e custou 45 milhões de dólares, no entanto já reduziu na ordem de U\$172 milhões as perdas por danos de enchentes nas três comunidades a que serve, de acordo com MWRDGC (2010). O Reservatório McCook, que está em construção, com previsão de término para



2024, terá capacidade de 38 bilhões de litros. Foi prevista, a partir de sua conclusão, uma redução estimada em U\$90 milhões por ano de perdas por enchentes, contribuindo com 3.100.000 pessoas em 37 comunidades.

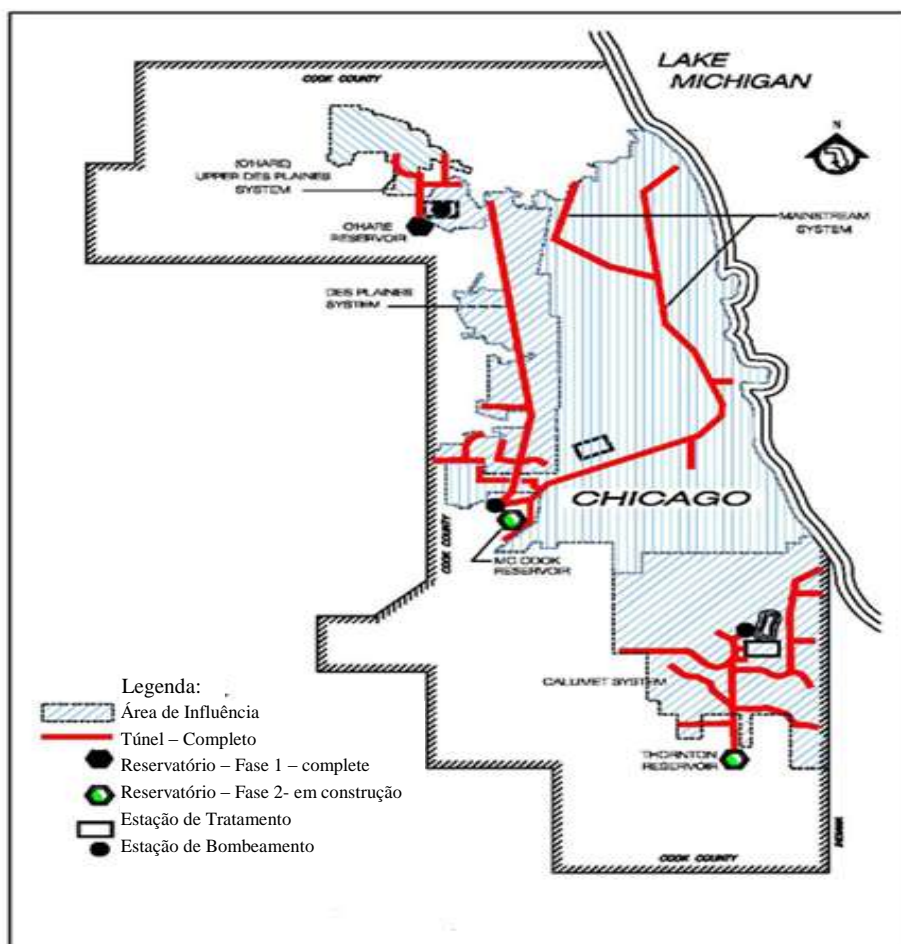


Figura 6 – Sistema de Túneis do TARP e Áreas de Influência

Fonte: MWRDGC, 2010

O Reservatório Thorton está sendo construído em dois estágios, o primeiro atual conta com um reservatório temporário, concluído em 2003, (Thornton Transitional Reservoir) de 11.75 bilhões de litros. O Segundo estágio é o reservatório permanente de 30 milhões de litros, com conclusão planejada para 2014, e previsão de redução de perdas em U\$40 milhões e benefícios a uma população de 556.000 habitantes em 15 comunidades (MWRDGC, 2010).

Com esse sistema, ocorreu uma melhora na qualidade do rio Chicago, Calumet e em outros cursos d'água da região. Houve também melhoria nas atividades turísticas, na vida aquática, nas pescarias, no aspecto recreacional e no aumento de valores imobiliário próximo aos rios. No entanto, em julho de 2010, a administração do Presidente Obama elevou o nível das exigências, a partir do Clean Water Act (Lei da Água Limpa) que requer que todos os cursos de água devem ser limpos o suficiente para recreação de contato primário, como natação ("recreation in and on the water"). Chicago é a única cidade Americana de grande porte que não desinfeta a água antes de devolvê-la ao ambiente.

Para atingir os requisitos dessa lei seria necessário um investimento multi-milionário em novas tecnologias de tratamento, assim como melhora no funcionamento do TARP. Apenas para desinfetar os efluentes das três estações de tratamento o distrito estimou um valor de U\$623 milhões aos pagantes de impostos, já a Environmental Protection Agency (EPA) estimou um valor menor de U\$242 milhões, ou cerca de U\$2 por mês por casa nas próximas duas décadas.

#### **4.1.3 – Calumet**

A área em estudo constitui-se da área de drenagem relativa ao sistema TARP Calumet. Como pode ser observado na Figura 6, já apresentada. Ela se localiza na parcela sul de Chicago e do condado Cook. De acordo com KIEFER e Associados (1976, apud Cantoño, 2009) o sistema Calumet serve uma área de aproximadamente 731 Km<sup>2</sup>, dos quais 233Km<sup>2</sup> possuem sistema combinado de esgotos. Essa área pode ser vista na **Figura 7**. O sistema possui cerca de 59 quilômetros de túneis profundos (**Figura 98**) e 63 *drop-shafts*, que se conectarão ao Reservatório Thorton.



*Drop-shafts* são comportas/extravasadores/poços, que a partir de um certo nível de água do sistema, abrem para um poço profundo, que leva a água do sistema combinado aos túneis profundos.

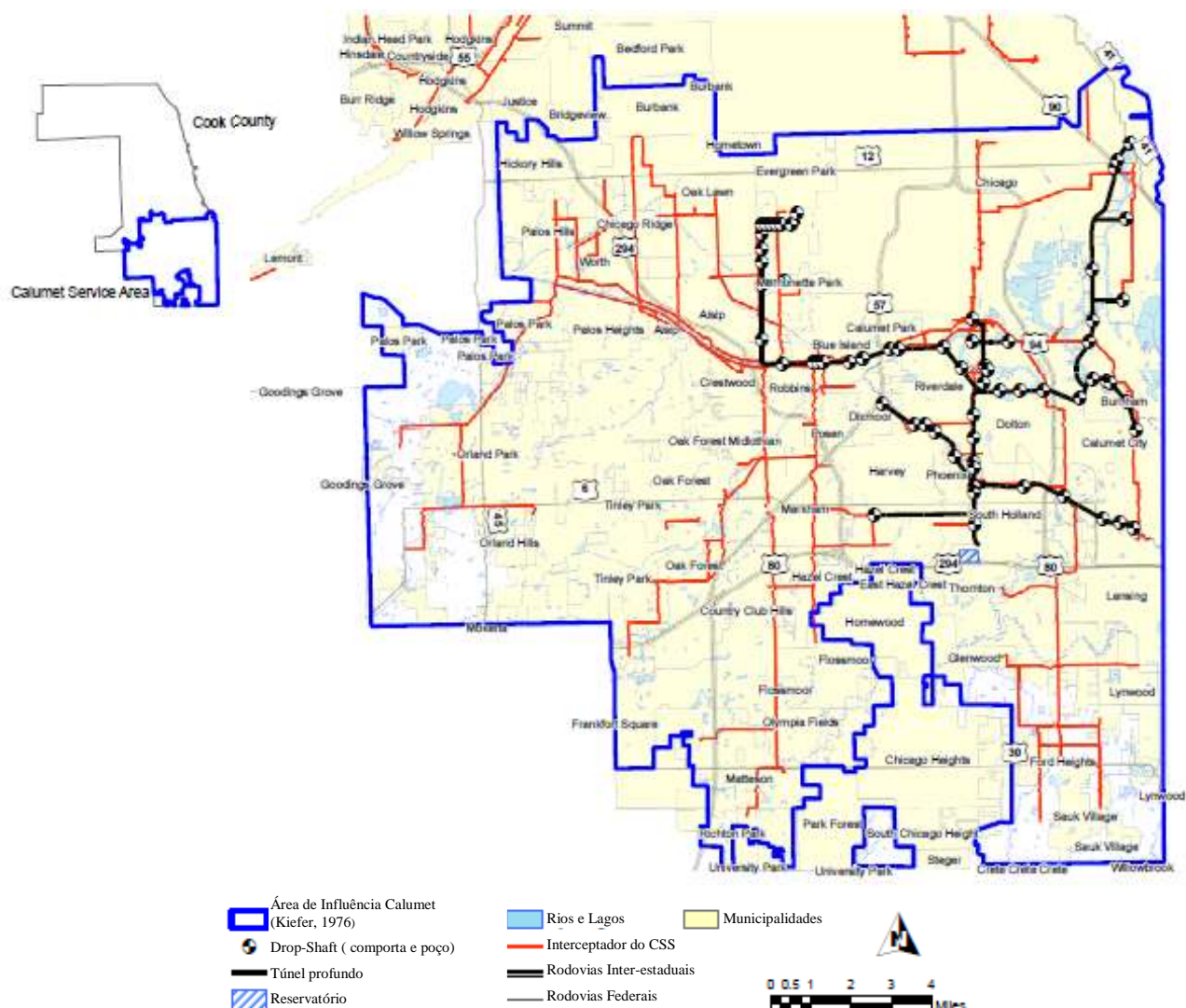


Figura 7 – Área de Serviço Calumet

Fonte: Cantone et al, 2009

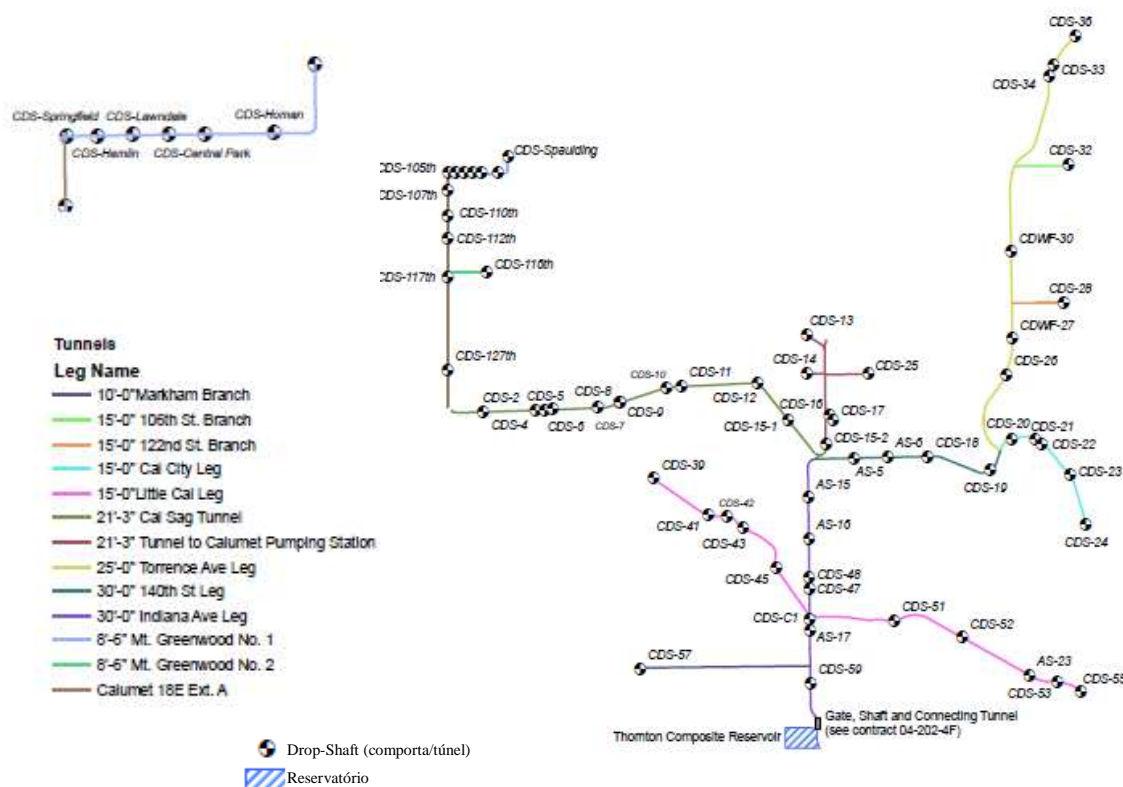


Figura 8– Sistema TARP Calumet

Fonte: Cantone et al, 2009

## 4.2 – MODELAGEM

### 4.2.1 – Modelos Hidrológicos

Modelo hidrológico é uma das ferramentas desenvolvidas para melhor entender e representar o comportamento de uma bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem propiciado o desenvolvimento de diversos modelos, que se diferenciam em função dos dados utilizados, da discretização espaço-temporal e das propriedades de representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados (TUCCI, 1998).

A estimativa dos parâmetros físicos de uma bacia na modelagem é um dos fatores mais importantes que caracteriza o modelo hidrológico. Pode-se trabalhar com parâmetros e variáveis homogêneas para cada bacia de drenagem, o que caracteriza o modelo tipo concentrado, ou parâmetros e variáveis que variam espacialmente pela área da bacia, caracterizando o modelo tipo distribuído.

Tucci (1998) definiu simulação como o processo de utilização do modelo, podendo esta ser dividida em três fases: estimativa ou ajuste dos parâmetros, onde é feita a determinação dos valores dos parâmetros; verificação, que é a simulação do comportamento da bacia para os parâmetros estimados, verificando a validade dos parâmetros utilizados; e a previsão da simulação com os parâmetros ajustados para a obtenção de suas respostas para diferentes entradas.

A utilização de modelos hidrológicos faz-se necessária para antecipar e representar cenários, como por exemplo, do impacto da expansão urbana de uma bacia antes que ela ocorra, como também a eficácia da implantação de medidas de controle de cheia ou de políticas. Os modelos hidrológicos podem ser utilizados, também, como ferramentas no planejamento urbano e de identificação de problemas.

#### **4.2.2 – Modelagem de Bacias Hidrográficas Urbanas**

Há uma diferença que deve ser levada em conta entre modelagem de uma bacia hidrográfica rural e uma bacia hidrográfica urbana. Enquanto que a modelagem hidrológica de uma bacia hidrográfica lida com a resposta hidrológica integrada dos processos na escala de bacia para determinar a resposta da bacia hidrográfica, hidrologia urbana pode ser definida como um braço da hidrologia que engloba a integração de processos hidrológicos e hidráulicos numa escala urbana para determinar a resposta da sub-bacia (CANTONE e SCHIMIDT, 2009).

Modelos hidrológicos para bacias urbanas podem ser utilizados no planejamento, projeto e operação de sistemas de águas pluviais, águas residuárias e em projetos de redes de sistemas combinados de águas pluviais e residuárias. Devem também ser utilizados para a avaliação, desenvolvimento e gestão de redes de sistemas de águas pluviais, residuárias ou combinado (CANTONE et al, 2009).

Considera-se neste estudo que os processos hidrológicos mais importantes ocorrem após a precipitação até que ocorra a saída do sistema, passando ou não pelo sistema de túneis subterrâneos para ser reservada na ocorrência de enchente, ou para a Estação de Tratamento (CHOW et al, 1988, MAIER, 2001 apud CANTONE, 2009).

A precipitação quando chega à superfície pode:

- cair em curso de água diretamente;
- infiltrar no solo;
- ter seu fluxo através do solo como fluxo de subsuperfície;
- escoar sobre a superfície do solo do ponto de impacto até a atingir um curso de água ou a entrada do sistema de drenagem subterrânea.
- ser interceptada pela vegetação, onde é armazenada temporariamente e, em seguida, evaporada para a atmosfera
- ser armazenada em depressões superficiais, onde infiltra no solo ou evapora para a atmosfera

O sistema hidrológico de interesse para este estudo está representado esquematicamente pela **Figura 9**.

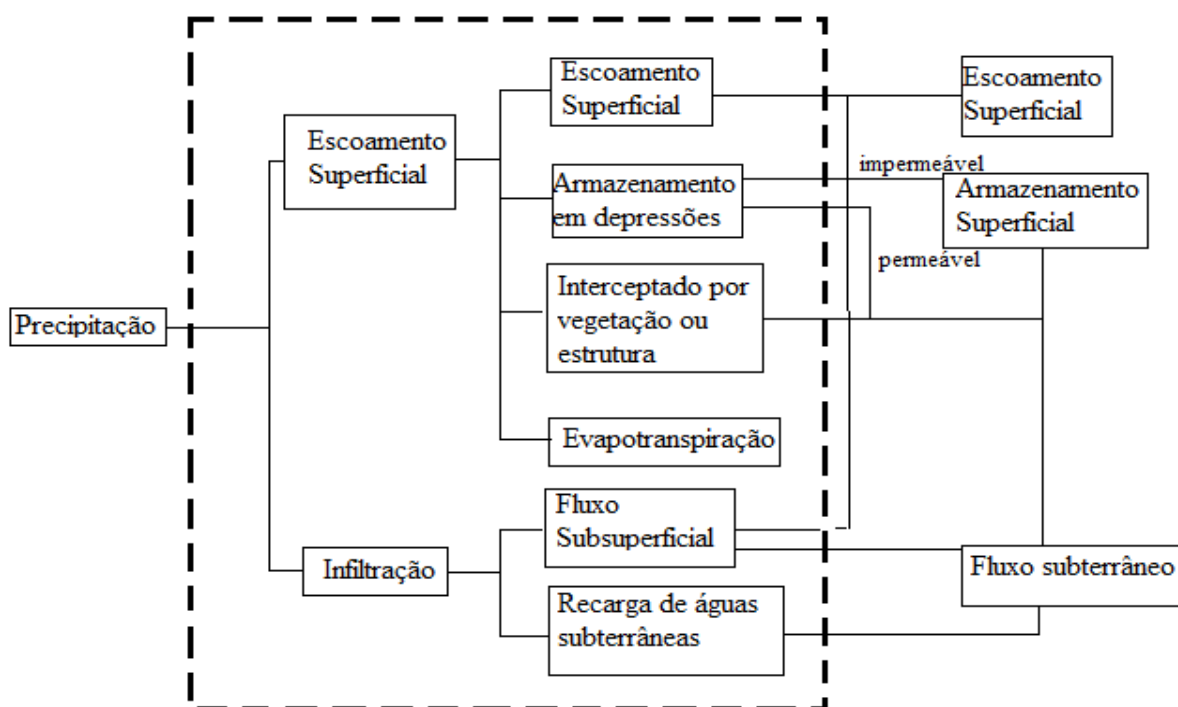


Figura 9– Esquema do Sistema Hidrológico

( Adaptado de Cantone, 2009)

A **Figura 10**, também adaptada de Cantone, 2009 representa os processos hidrológicos da **Figura 9** em um sistema como o abordado de rede combinada de água pluvial e esgotos e túneis e reservatório subterrâneo.

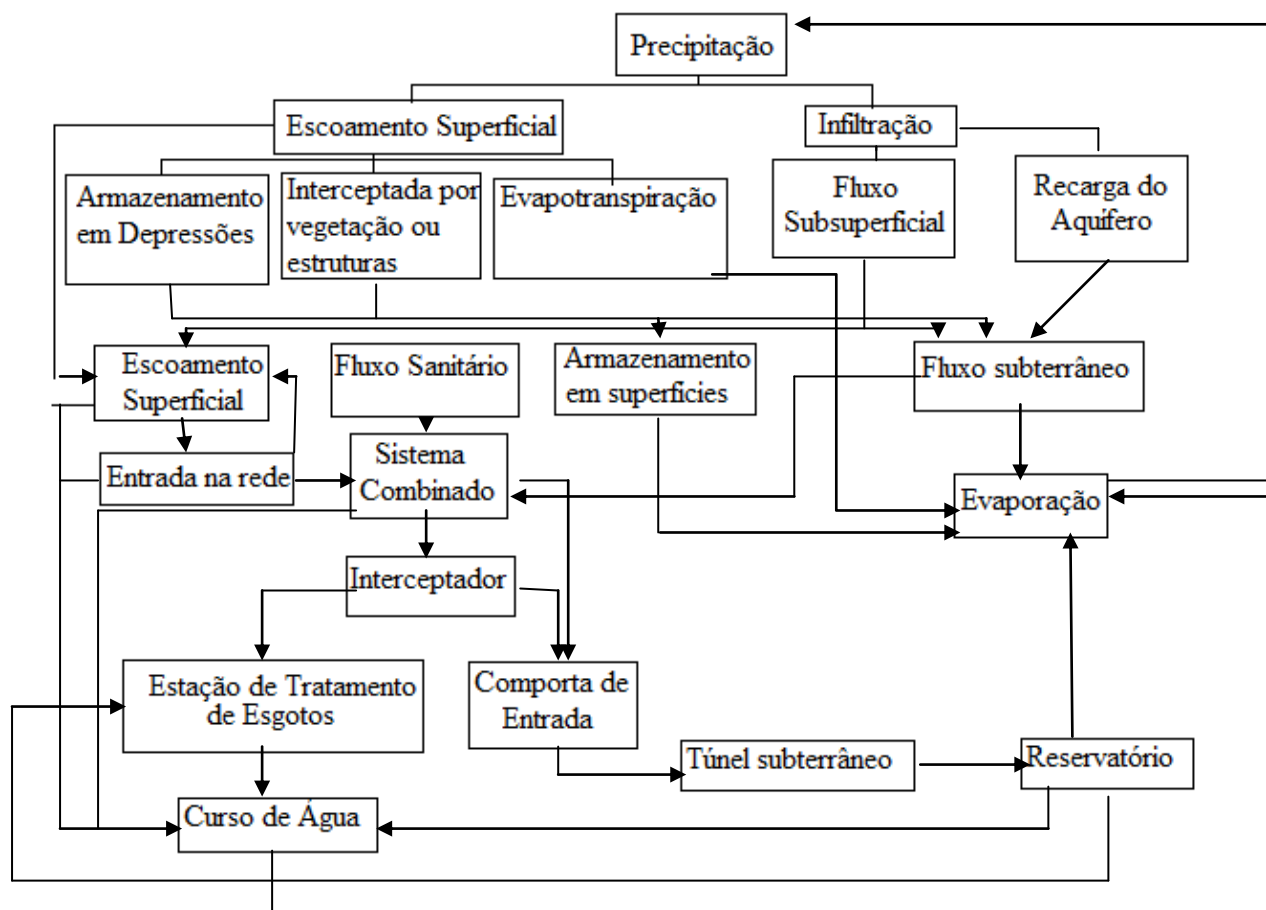


Figura 10– Sistema hidrológico e TARP

(adaptado de Cantone, 2009)

#### 4.2.3 - Matlab

O MATLAB é um software de alta performance e de ambiente interativo para desenvolvimento de algoritmo, visualização e análise de dados, e cálculo numérico. Possibilita resolver problemas técnicos de computação mais rápido do que com linguagens de programação tradicionais, como C, C++ e Fortran. Pode ser utilizado para uma ampla gama de aplicações, incluindo processamento de sinal e imagem, comunicação, design de controle, teste e medição, modelagem e análise financeira, e de biologia computacional (MATLAB, 2010).

O Matlab é um software destinado a fazer cálculos com matrizes (Matlab = MATrix LABoratory). Foi criado no fim dos anos 1970 por Cleve Moler, então chefe do departamento de ciências da computação da Universidade do Novo México. Ela logo se espalhou para outras universidades e encontrou um forte uso no âmbito da comunidade matemática aplicada. A linguagem foi então reescrita em C, em 1984 por Jack Little, Moler e Steve Bangert, que fundaram a MathWorks e prosseguiram no seu desenvolvimento. O MATLAB foi adotado pela primeira vez por engenheiros de projeto de controle, a especialidade de Little, e rapidamente se espalhou para outros campos de aplicação. Atualmente, é utilizado nas áreas da educação, em especial o ensino da álgebra linear e análise numérica, e é muito popular entre os cientistas envolvidos com o processamento de imagem (MATLAB, 2010).

#### 4.3 – O MODELO

Como apresentado anteriormente com o caso de Chicago, nas cidades americanas é comum a utilização do sistema combinado de águas pluviais e esgoto sanitário, no entanto, com o aumento da urbanização, chuvas de alta intensidade e duração provocam enchentes levando esta água para as ruas, porões das casas, e aos rios/lagos sem o devido tratamento. Desta forma, a cidade de Chicago adotou o Plano de Túnel e Reservatório (TARP) em 1972 para resolver os problemas de inundações, poluição e saúde pública.

O modelo utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Hongyi Li, PhD e Murugesu Sivapalan, PhD, da Universidade de Illinois em Urbana-Champaign (UIUC). O modelo estava em fase final sendo terminado e adaptado para a pesquisa. Consiste em um modelo de reservatório ou “balde” (“bucket model”) de um sistema combinado, não possuindo uma percepção espacial, mas uma visão global, procurando entender de forma teórica o fenômeno da hidrologia urbana e principais elementos do sistema.

O modelo traz quatro diferentes tipos de enchentes. O primeiro (Combined Sewer Overflow -CSO I) ocorre quando a capacidade de entrada do sistema combinado de esgotos é excedida, acarretando em inundações no nível da rua. O segundo (CSO II) ocorre quando a capacidade de transporte da rede combinada de água pluvial e esgotos é excedida, ocasionando inundações de porões das casas. Este tipo de inundação ocorria com certa frequência, ocasionando diversos problemas aos moradores. Estes dois tipos de CSOs podem ser mais facilmente entendidos pela **Figura 11**:

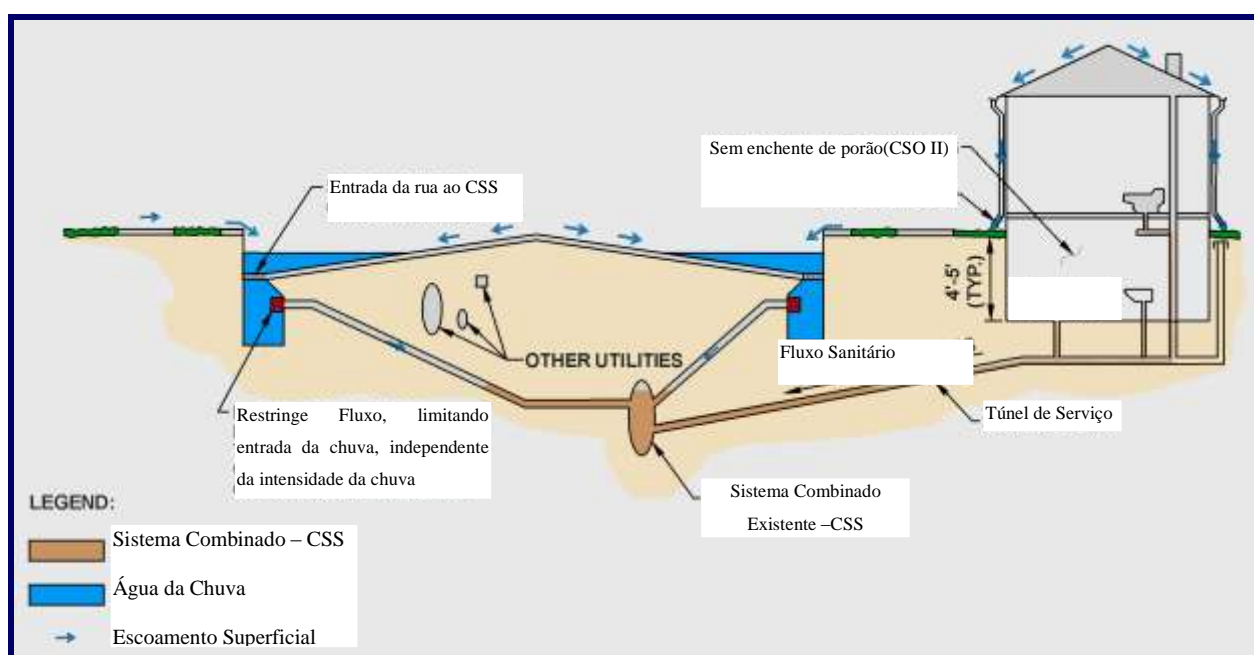


Figura 11- – Esquema do Sistema Combinado de Águas e Esgotos

Fonte: UIUC

O terceiro (CSO III) ocorre quando a capacidade da Estação de Tratamento e as capacidades de entrada e de transporte dos túneis subterrâneos (TARP) são excedidas, ocorrendo transporte desta água ao rio ou lago. O quarto (CSO IV) ocorre quando a capacidade de armazenamento dos túneis e reservatório (TARP) é excedida, também acarretando no transporte de água ao rio ou lago. O esquema, **Figura 11**, abaixo mostra o sistema e o TARP, e proporciona um melhor entendimento dos CSOs.



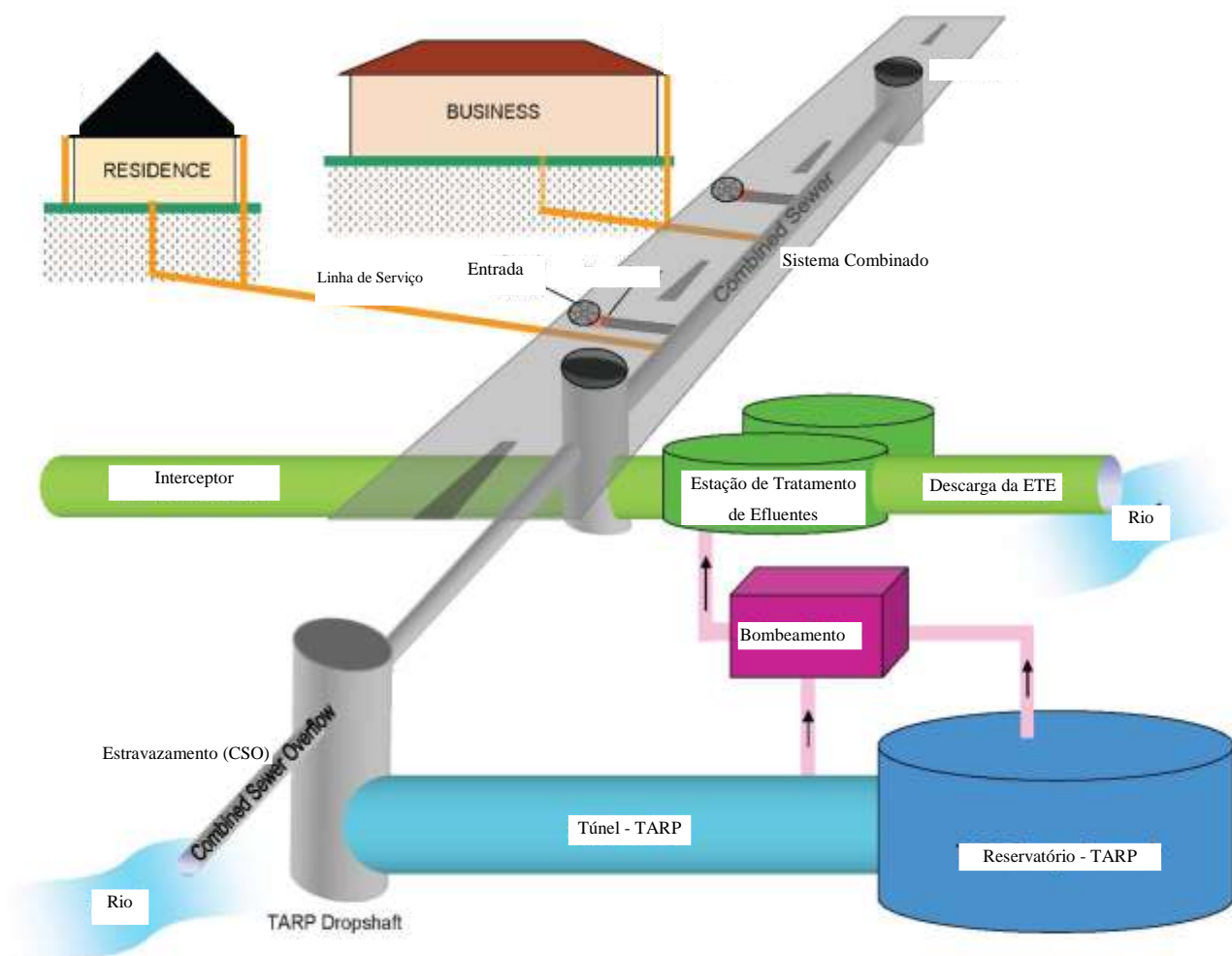


Figura 12–Sistema combinado e TARP

Fonte: UIUC

Os esquemas apresentados a seguir, **Figura 13** e **Figura 14**, exemplificam a concepção do modelo. O funcionamento do modelo segue os esquemas mostrados, no entanto, uma descrição mais detalhada será feita para cada fase do modelo. As equações que seguem são provenientes do trabalho de Hongyi Li (2010, informação pessoal).

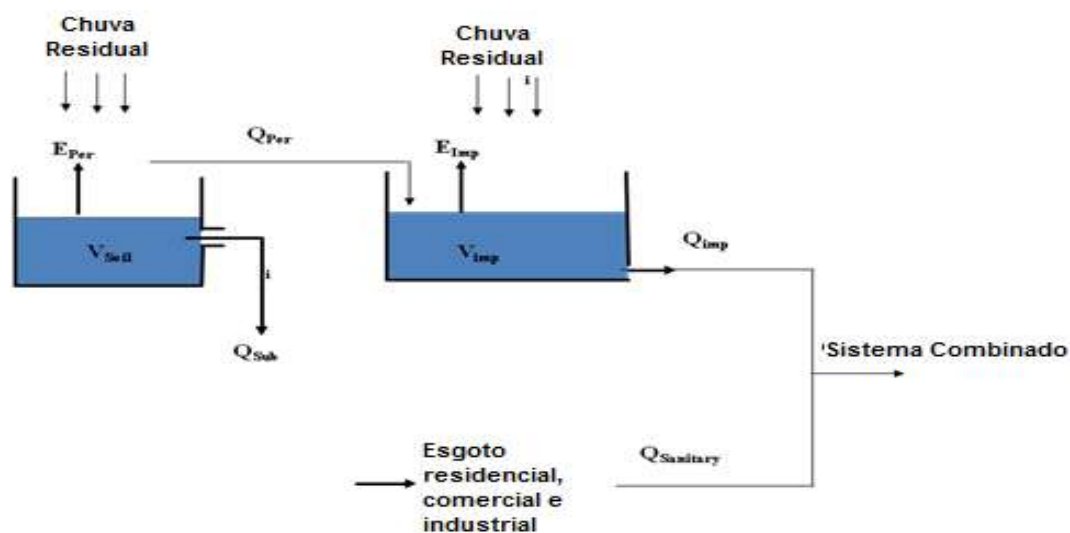


Figura 13– Esquema de concepção do modelo

Fonte: Adaptado de Hongyi Li (2010, informação pessoal)

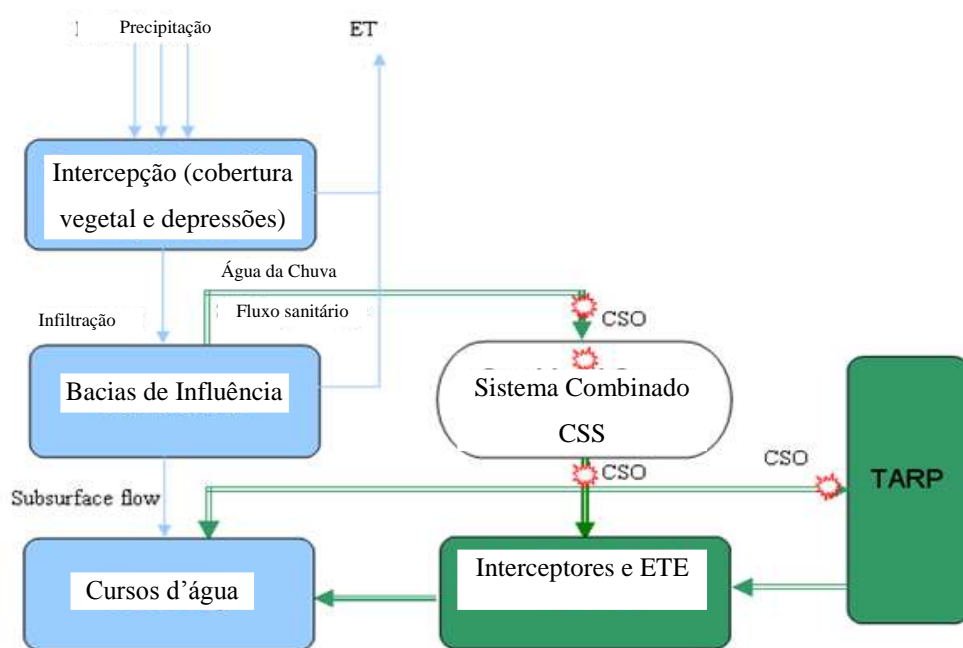


Figura 14– Esquema de funcionamento do sistema e de concepção do modelo

Fonte: Hongyi Li (2010, informação pessoal)

### 4.3.1 - Intercepção na cobertura vegetal e em depressões superficiais

A intercepção da água de chuva pela cobertura vegetal e por depressões superficiais é representada no modelo por um único reservatório. O balanço de massas é dado por:

$$\frac{dS_{\text{int}}(t)}{dt} = I(t) - e_{\text{int}}(t) \quad (1)$$

$S_{\text{int}}(t)$  é o total armazenado no instante, [m].  $I(t)$  é a taxa de chuva interceptada, [m/s].

$e_{\text{int}}(t)$  é a taxa de evapotranspiração, [m/s].

$$I(t) = \begin{cases} p(t) & S_{\text{int}}(t) < S_{\text{int,max}} \\ 0 & S_{\text{int}}(t) \geq S_{\text{int,max}} \end{cases} \quad (2)$$

$$e_{\text{int}}(t) = \begin{cases} EP(t) & S_{\text{int}}(t) > 0 \\ 0 & S_{\text{int}}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$p(t)$  é a intensidade da chuva, [m/s].  $EP(t)$ , a taxa de evapotranspiração potencial, [m/s].

$S_{\text{int,max}}$ , a capacidade máxima de armazenamento, ou seja, o máximo que é interceptado pela cobertura vegetal, ou por depressões.

### 4.3.2 - Processos nas áreas impermeáveis

A área impermeável é tratada como um reservatório de superfície. O balanço de massa é dado por:

$$\frac{dS_{\text{imp}}(t)}{dt} = [p(t) - I(t)] \frac{A_{\text{imp}}}{A_{\text{imp}} + A_{\text{per}}} - e_{\text{imp}}(t) - q_{\text{imp}}(t) \quad (4)$$

$S_{imp}(t)$  é o armazenamento atual de águas de chuva em áreas impermeáveis, [m].  $e_{int}(t)$  é a taxa de evapotranspiração, [m/s].  $q_{imp}(t)$  é a taxa de escoamento superficial de áreas impermeáveis das redes combinadas de esgotos sanitários e água pluvial (combined sewer system - CSS), [m/s].  $A_{imp}$  e  $A_{per}$  são as áreas totais impermeáveis e permeáveis, respectivamente.

$$e_{imp}(t) = \begin{cases} EP_{imp}(t) & S_{imp}(t) > 0 \\ 0 & S_{imp}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$EP_{imp}(t) = [EP(t) - e_{int}(t)] * A_{imp} / (A_{imp} + A_{per}), \text{ [m/s]}.$$

$$q_{imp}(t) = \frac{S_{imp}(t)}{T_{imp}} \quad (6)$$

$T_{imp}$  é o tempo médio de residência do escoamento superficial através da área impermeável até a entrada no CSS.

#### 4.3.3 - Processos nas áreas permeáveis

A área permeável consiste de dois reservatórios: o de água superficial e o de água subsuperficial. Para o reservatório de água superficial, o balanço de massas é dado por:

$$\frac{dS_{per\_sur}(t)}{dt} = [p(t) - I(t)] \frac{A_{per}}{A_{imp} + A_{per}} - e_{per\_sur}(t) - q_{per\_sur}(t) - f_{per}(t) \quad (7)$$

$S_{per\_sur}(t)$  é o armazenamento atual de água superficial em áreas permeáveis, [m].

$e_{per\_sur}(t)$ , a taxa de evaporação da água superficial, [m/s].  $q_{per\_sur}(t)$ , a taxa de escoamento

superficial das áreas permeáveis em direção ao CSS, [m/s].  $f_{per}(t)$ , a taxa de infiltração, [m/s].

$$e_{per\_sur}(t) = \begin{cases} EP_{per\_sur}(t) & S_{per\_sur}(t) > 0 \\ 0 & S_{per\_sur}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$EP_{per\_sur}(t) = [EP(t) - e_{int}(t)] * A_{per} / (A_{imp} + A_{per}), \text{ [m/s]}.$$

$$q_{per\_sur}(t) = \frac{S_{per\_sur}(t)}{T_{per} + T_{imp}} \quad (9)$$

$T_{per}$  é o tempo médio de residência do escoamento superficial através da área permeável em direção a área impermeável. Foi assumido que o escoamento superficial gerado na área permeável flui primeiramente pela área impermeável até às entradas no sistema combinado, CSS.

$$f_{per}(t) = \begin{cases} [p(t) - I(t)] A_{per} / (A_{imp} + A_{per}) & S_{per\_sub}(t) < S_{sub,max1} \\ 0 & S_{per\_sub}(t) = S_{sub,max1} \end{cases} \quad (10)$$

$S_{sub,max1}$  é a capacidade de armazenamento subsuperficial. Esta capacidade foi determinada a partir da porosidade e profundidade média do solo. Em relação a capacidade de infiltração, considerou-se como grande o suficiente, ou seja, independente da intensidade da chuva toda precipitação infiltra na área permeável, até atingir a capacidade de armazenamento sub-superficial. Para corrigir este ponto, por enquanto, foi assumido que a área impermeável é um pouco superior ao que realmente é.

Para o reservatório de subsuperfície, o balanço de massas é dado por:

$$\frac{dS_{sub}(t)}{dt} = f_{per}(t) - e_{sub}(t) - q_{sub}(t) \quad (11)$$

$e_{sub}(t)$  é a taxa de evapotranspiração da água de subsuperfície, [m/s].  $q_{sub}(t)$  é taxa de fluxo da água subsuperficial aos canais e rios, [m/s].

$$e_{sub}(t) = (EP_{per\_sur} - e_{per\_sur}) \frac{S_{sub}(t)}{S_{sub,max1}} \quad (12)$$

$$q_{sub}(t) = \begin{cases} (S_{sub}(t) - S_{sub,max2})/T_{sub} & S_{sub}(t) > S_{sub,max2} \\ 0 & S_{sub}(t) \leq S_{sub,max2} \end{cases} \quad (13)$$

$S_{sub,max2}$  é a capacidade limite de armazenamento para geração de fluxo subsuperficial.

#### 4.3.4 - Processos Relativos ao Sistema Combinado de Esgotos

##### (Combined Sewer System-CSS)

O sistema combinado de esgotos transporta água de chuva e esgoto sanitário. Deve-se levar em consideração a capacidade de entrada no sistema e a capacidade de transporte.

$$q'_{css\_in}(t) = \begin{cases} q_{imp}(t) + q_{per\_sur}(t) + q_{sanitary}(t) & q_{imp}(t) + q_{per\_sur}(t) + q_{sanitary}(t) \leq q_{css\_in,max} \\ q_{css\_in,max} & q_{imp}(t) + q_{per\_sur}(t) + q_{sanitary}(t) > q_{css\_in,max} \end{cases} \quad (14)$$

$q_{sanitary}(t)$  é a taxa de entrada de esgoto sanitário ao CSS, [m/s].  $q_{css\_in,max}$  é a capacidade de entrada no sistema-CSS, [m/s]. Caso esta capacidade seja excedida ocorrem inundações das ruas. Este tipo de inundação foi denominado com CSO I, Combined Sewer Overflow, e é dado por:

$$q_{cso,I}(t) = \begin{cases} 0 & q_{imp}(t) + q_{per\_sur}(t) + q_{sanitary}(t) \leq q_{css\_in,max} \\ q_{imp}(t) + q_{per\_sur}(t) + q_{sanitary}(t) - q_{css\_in,max} & q_{imp}(t) + q_{per\_sur}(t) + q_{sanitary}(t) > q_{css\_in,max} \end{cases} \quad (15)$$

O CSO que fica armazenado em um pequeno reservatório na entrada, quando a capacidade de entrada permite a água de chuva retorna ao sistema combinado:

$$q_{catch\_css}(t) = \begin{cases} 0 & q'_{css\_in}(t) \geq q_{css\_in,max} \\ q_{css\_in,max} - q'_{css\_in}(t) & q'_{css\_in}(t) < q_{css\_in,max} \end{cases} \quad (16)$$

Na entrada da chuva ao sistema combinado há um certo, pequeno, potencial de armazenamento, se este armazenamento é excedido, a água não pode mais entrar no sistema, tornando-a em CSO I, inundação de rua. Isto ocorre principalmente nos locais em que os bloqueadores de chuva (“rain blockers”) foram implantados, que não permitem a saída do sistema à rua. Nos locais onde não existem estes bloqueadores, a água pode retornar do armazenamento para a rua.

$$q_{catch\_lost}(t) = \begin{cases} 0 & V_{catch}(t) < V_{catch,max} \\ \left( V_{catch}(t) - V_{catch,max} + \frac{\partial T * (Q_{css\_in\_cso}(t) - Q_{catch\_css}(t))}{T_{catch}} \right) / T_{catch} & V_{catch}(t) \geq V_{catch,max} \end{cases} \quad (17)$$

$V_{catch}(t)$  é o nível de armazenamento no instante t.  $V_{catch,max}$  é a capacidade máxima de armazenamento, que caso excedido acarreta no CSO I.  $T_{catch}$  é o tempo médio de detenção do CSO I até o curso de água.

O balanço de massas segue:

$$\frac{dV_{catch}(t)}{dt} = q_{cso,I}(t) - q_{catch\_css}(t) - q_{catch\_lost}(t) \quad (18)$$

O transporte do líquido é simulado por uma função de resposta baseada no hidrograma unitário:

$$q_{css}(t) = \int_0^t u(t-\tau)q_{css\_in}(\tau)d\tau \quad (19)$$

A capacidade de transporte do CSS é  $q_{css\_conv,max}$ , [m/s]. Se esta for excedida, enchentes ocorrem nos porões, denotadas como CSO II

$$q_{cso,II} = \begin{cases} 0 & q_{css}(t) \leq q_{css\_conv,max} \\ q_{css}(t) - q_{css\_conv,max} & q_{css}(t) > q_{css\_conv,max} \end{cases} \quad (20)$$

CSO II é temporariamente armazenado nos porões, e o líquido retorna ao sistema combinado – CSS, assim que a capacidade de transporte deste permitir.

$$q_{basement\_css}(t) = \begin{cases} 0 & q_c(t) \geq q_{c\_sc\_s,m o} \\ q_{css\_conv,max} - q_{css}(t) & q_c(t) < q_{c\_sc\_s,m o} \end{cases} \quad (21)$$

A saída do sistema combinado é:

$$q_{css\_out}(t) = q_{css}(t) + q_{basement\_css}(t) \quad (22)$$

O balanço de massas do armazenamento nos porões é dado por:

$$\frac{dV_{basement}(t)}{dt} = q_{cso,II}(t) - q_{basement\_css}(t) \quad (23)$$

#### 4.3.5 - Processos relacionados ao TARP e à Estação de Tratamento

Para a Estação de Tratamento o balanço de massas é dado por:

$$\frac{dS_{wwtp}(t)}{dt} = q_{wwtp\_in}(t) + q_{tarp\_out}(t) - q_{wwtp\_out}(t) \quad (24)$$



$q_{wwtp\_in}(t)$  é a taxa de saída do CSS para a Estação (Waste Water Treatment Plant – WWTP), [m/s].  $q_{tarp\_out}(t)$  é a taxa de bombeamento do TARP a WWTP, [m/s].  $q_{wwtp\_out}(t)$  é a taxa de saída do efluente tratado da WWTP ao curso de água, [m/s].

$$q_{wwtp\_in}(t) = \begin{cases} q_{css\_out}(t) & q_{css\_out}(t) \leq q_{wwtp\_in,max} \text{ \& \& } V_{wwtp}(t) < V_{wwtp,max} \\ q_{wwtp\_in,max} & q_{css\_out}(t) > q_{wwtp\_in,max} \text{ \& \& } V_{wwtp}(t) < V_{wwtp,max} \\ 0 & V_{wwtp}(t) \geq V_{wwtp,max} \end{cases} \quad (25)$$

$$q_{wwtp\_out}(t) = \begin{cases} C_{wwtp\_out} & V_{wwtp}(t) > 0 \\ 0 & V_{wwtp}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (26)$$

$$q_{tarp\_out}(t) = \begin{cases} C_{tarp\_out} \\ q_{wwtp\_in,max} - q_{wwtp\_in}(i) \\ 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} p(t) = 0 \text{ \& \& } V_{wwtp}(i) < \alpha V_{wwtp,max} \text{ \& \& } C_{tarp\_out} + q_{wwtp\_in}(t) &\leq q_{wwtp\_in,max} \\ p(t) = 0 \text{ \& \& } V_{wwtp}(i) < \alpha V_{wwtp,max} \text{ \& \& } C_{tarp\_out} + q_{wwtp\_in}(t) &> q_{wwtp\_in,max} \end{aligned} \quad (27)$$

$\alpha$  é um valor menor do que uma unidade, que é utilizada para limitar o fluxo do TARP a WWTP. Este fluxo só ocorre após o término da chuva e é assumido limitado pela capacidade da WWTP.

Para o TARP o balanço é:

$$\frac{dS_{tarp}(t)}{dt} = q_{tarp\_in}(t) - q_{tarp\_out}(t) \quad (28)$$

$q_{tarp\_in}(t)$  é o fluxo vindo da rede - CSS, [m/s], dado por:

$$q_{tarp\_in}(t) = \begin{cases} q_{css\_out}(t) - q_{wwtp\_in}(t) & q_{css\_out}(t) - q_{wwtp\_in}(t) > q_{tarp\_in,max} \text{ \&\& } V_{tarp}(t) < V_{tarp,max} \\ q_{tarp\_in,max} & q_{css\_out}(t) - q_{wwtp\_in}(t) \leq q_{tarp\_in,max} \text{ \&\& } V_{tarp}(t) < V_{tarp,max} \\ 0 & V_{tarp}(t) \geq V_{tarp,max} \end{cases} \quad (29)$$

$q_{tarp\_out}(t)$  é a taxa de água bombeada do TARP para a WWTP para tratamento.

Caso o fluxo de água proveniente do CSS exceda a capacidade de entrada do TARP (combinação da capacidade de entrada e de transporte), é necessário que o esgoto seja despejado no rio, ocorrendo um “outflow”- CSO III:

$$q_{cso,III}(t) = \begin{cases} q_{css\_out}(t) - q_{wwtp\_in}(t) - q_{tarp\_in,max} & q_{css\_out}(t) - q_{wwtp\_in}(t) > q_{tarp\_in,max} \\ 0 & q_{css\_out}(t) - q_{wwtp\_in}(t) \leq q_{tarp\_in,max} \end{cases} \quad (30)$$

Se a capacidade do TARP tiver atingido o limite, o esgoto também será despejado ao curso de água. Este é o CSO IV:

$$q_{cso,IV}(t) = \begin{cases} q_{css\_out}(t) - q_{wwtp\_in}(t) & V_{tarp}(t) \geq V_{tarp,max} \\ 0 & V_{tarp}(t) < V_{tarp,max} \end{cases} \quad (31)$$

## 5 - ANÁLISE DE DADOS

### 5.1 - USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Os dados em relação ao uso e ocupação do solo da área Calumet na cidade de Chicago foram fornecidos pelo grupo TARP do Hydro Systems Laboratory da Universidade de Illinois, estes se encontram em formato WebGIS (2008), fornecido previamente pelo United States Geological Survey (USGS). De acordo com Cantone et al, 2009, a ocupação predominante na área é residencial (36,70%), no entanto há uma alta distribuição comercial e industrial na área; com o total de 6,54% de área industrial e 10,98% da área é comercial. Cerca de 35% da área é composta por terrenos cultivados, florestas, e zonas alagadas (wetlands), mas esta vegetação localiza-se nas extremidades oeste e leste da área em estudo, não na parte central. O mapa de uso e ocupação dos solos segue abaixo, **Figura 15**.

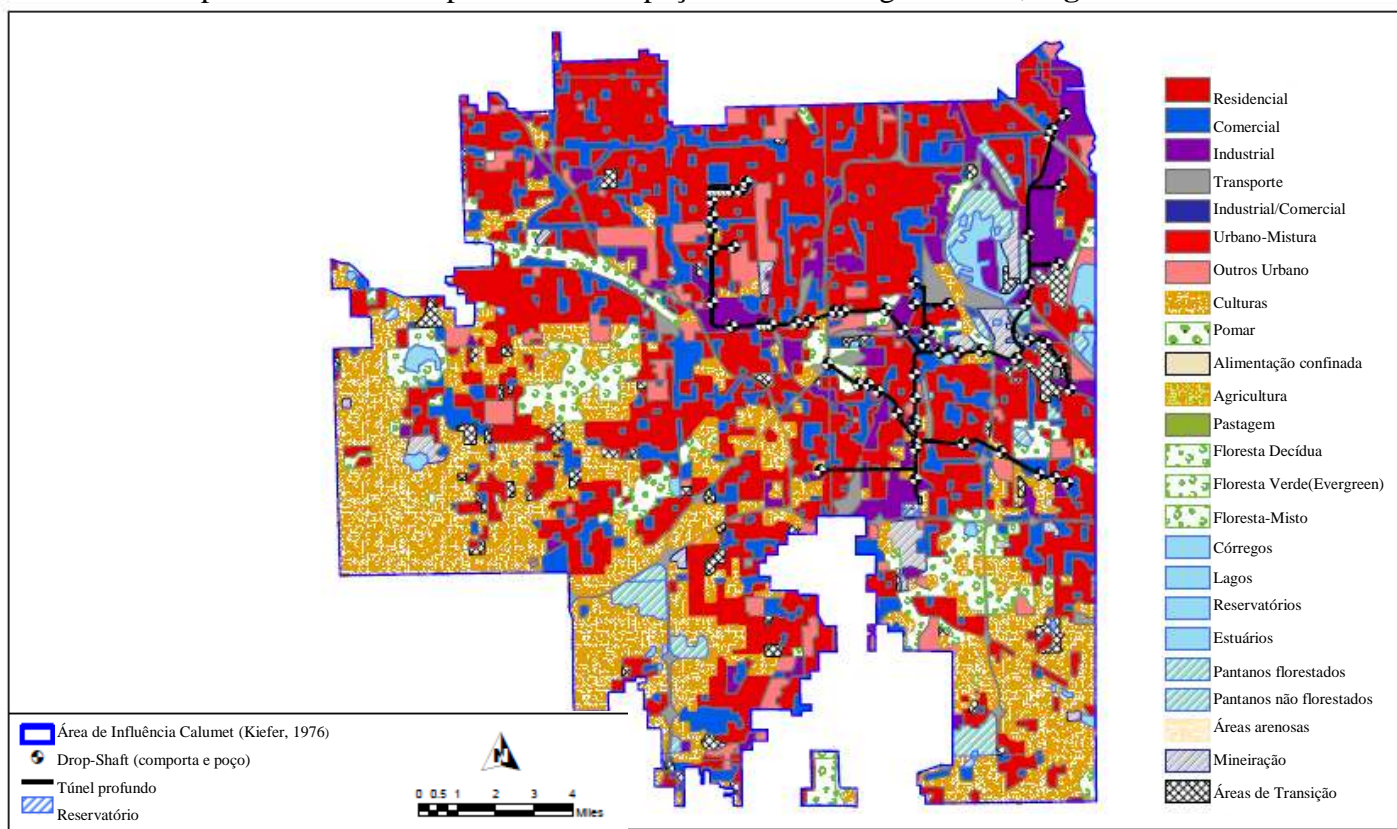


Figura 15-Uso e Ocupação dos Solos da Área de Calumet

Fonte: Cantone et al, 2009

O trabalho desenvolvido por Cantone et al (2009) delineou 47 áreas de sub-bacias, que possuem sistemas combinados de esgotos. Estas sub-bacias foram utilizadas nesta pesquisa para avaliação da área total com sistema combinado de esgotos e água pluvial e a porcentagem da área impermeável. As áreas impermeáveis foram definidas por Cantone et al (2009) a partir do método baseado em Chow et al (1988) e Mays (2001) onde cada tipo de uso/ocupação possui um percentual de área impermeável, **Tabela 2** Baseando-se no mapa de uso e ocupação do solo e na **Tabela 2** foi determinado o percentual de cada sub-bacia (Cantone et al, 2009). A tabela com as áreas e percentual de área impermeável é apresentada na **Tabela 3**, e a partir desta foi calculada a área total com sistema combinado e o percentual de área impermeável, **Tabela 4**.

Ocupação	% de Área Impermeável
Residencial	40
Comercial	60
Industrial	70
Vias de transporte	80
Industrial e comercial	65
Urbano mistura	40
Urbano outros	40
Área cultivada e pasto	15
Pomares, etc	15
Outros tipos de agricultura	15
Floresta Decídua	10
Lagos e Reservatórios	0
Áreas úmidas -Wetlands	0
Minas, pedreiras	20
Áreas de transição	10

Tabela 2– Uso e ocupação do Solo e % de área Impermeável

Fonte: Cantone et al, 2009

Sub-bacia	Área (m <sup>2</sup> )	Imperm. (%)
2	1108433.86	44
4	1591628.46	42
5	976911.04	48
6	2467772.79	45
7	2279593.98	46
8	812204.00	41
9	1556420.82	54
10	8870708.35	52
11	13219055.12	43
12	2567730.13	42
13	11603145.52	48
14	1141213.39	46
16	336293.73	42
17	1623193.94	52
18	1315228.20	44
20	3353629.57	46
21	1219722.40	34
22	296634.54	53
23	261426.90	26
24	10720526.23	39
25	1176825.72	47
26	611075.26	45
28	1638976.68	45
32	1511905.40	41

33	101171.40	57
34	14779927.48	47
36	817869.60	51
39	3470583.71	42
41	7411412.08	45
42	3695588.90	50
43	613503.37	43
45	1413971.49	44
47	682704.61	50
51	3419188.63	47
53	309989.17	42
55	12851600.60	43
57	1255334.73	40
spaulding	3027857.66	42
homan	135569.68	40
c. park	45729.47	46
lawndale	76485.58	44
Hamlin	76890.26	45
springfield	102385.46	46
105th	46943.53	40
107th	237955.13	45
110th	50585.70	41
116th	7206236.48	43

Tabela 3– Área e grau de impermeabilidade das sub-bacias

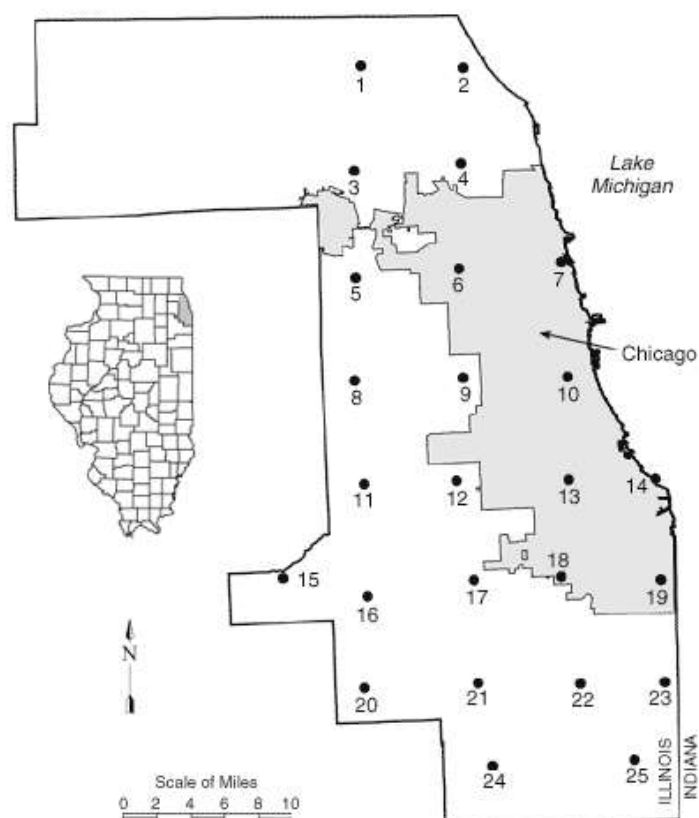
Fonte: Cantone et al, 2009

Área Total (m <sup>2</sup> )	134.089.873,30
Área Total Impermeável (m <sup>2</sup> )	60.303.014,67
Área Impermeável (%)	44,972
Área Permeável (%)	55,028

Tabela 4 – Área Total e Impermeável

## 5.2 - PRECIPITAÇÃO

A área de Chicago possui informações disponíveis de precipitação a partir de um conjunto de redes de postos pluviométricos operados por diferentes agências. Uma destas redes, que conta com 25 postos pluviométricos na área do condado Cook é o Illinois State Water Survey (ISWS), um mapa com os postos pode ser visto na **Figura 16**.



Copyright Illinois State Water Survey

Figura 16– Postos Pluviométricos da rede do Illinois State Water Survey

Fonte: Illinois State Water Survey, 2010

A rede ISWS tem operado desde 1989, os registros de precipitação por hora foram disponibilizados à Universidade de Illinois. Cantone et al (2009) conduziu uma análise de

confiabilidade da rede pluviométrica através da análise de curva de massa dupla comparando o posto 18 com os outros ao seu redor ( 17, 19, 21, 22 e 23). A curva é apresentada na **Figura 17** e mostra boa correlação entre os postos.

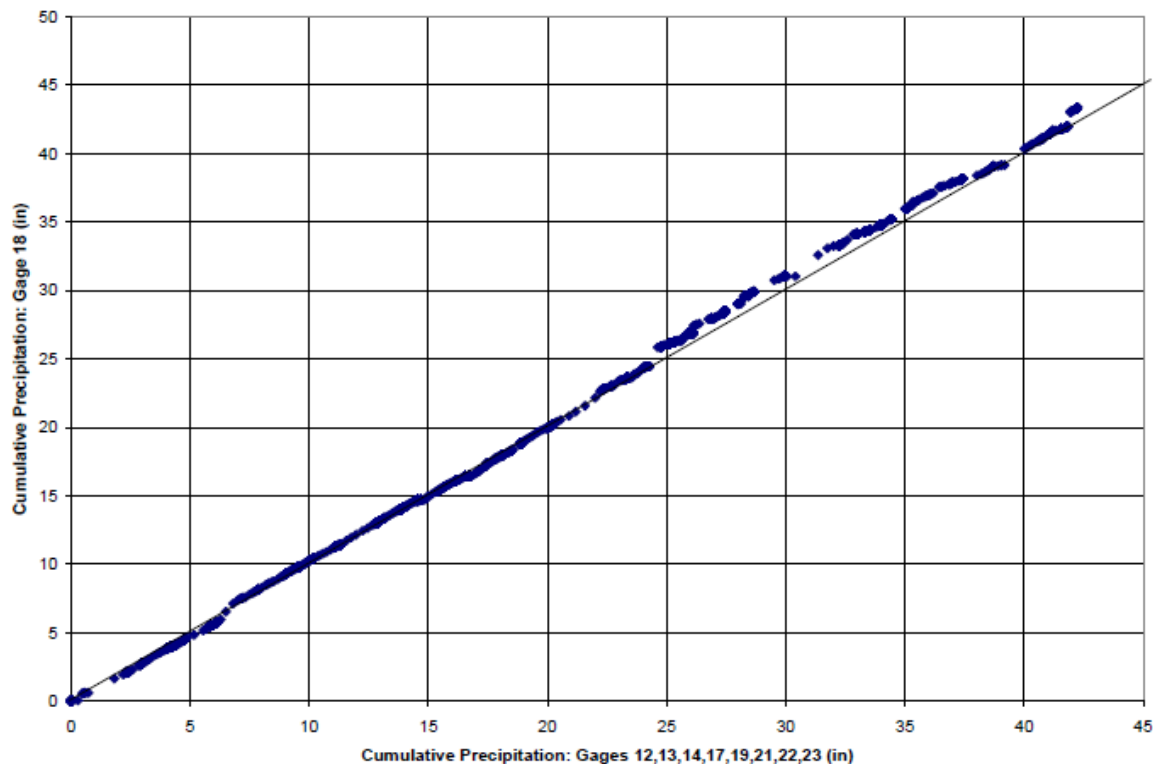


Figura 17 – Curva de Dupla Massa para o posto ISWS 18

Fonte: Cantone et al, 2009

### 5.3 - EVAPORAÇÃO

Os dados de evaporação utilizados foram disponibilizados por Hongyi Li ( 2010, informação pessoal). Os dados são relativos à bacia de Salt Creek em Illinois, uma região próxima e também urbanizada; assumiu-se a evaporação destas áreas como iguais. Os dados utilizados são horários e os registros são dos anos hidrológicos (outubro a setembro) de 2001 a 2006.

## 5.4 – TARP

### 5.4.1 – Capacidade de Armazenamento

Os dados relativos ao TARP e CSS foram obtidos através dos Prof. Dr. Arthur Schimidt e Kevin Miller (2010, informação pessoal) do Hydro System Laboratory da Universidade de Illinois. A capacidade de armazenamento nos túneis profundos do TARP é de cerca de 217.348 m<sup>3</sup>, a capacidade de armazenamento do atual reservatório (o Thorton), que entrou em operação em Março de 2003, é de 11,75 milhões de m<sup>3</sup>. Com a conclusão do reservatório Thorton este total passará a 30 milhões de m<sup>3</sup>.

### 5.4.2 - Capacidade de entrada e transporte

Este parâmetro é de difícil determinação, visto que é uma combinação das capacidades de entrada e de transporte de um sistema tão complexo e grande como o TARP. Foram analisadas diferentes capacidades.

Capacidades dos interceptadores do sistema combinado, ou seja a capacidade limite para entrada no sistema TARP; para a entrada nos Túneis do TARP há poços (*drop-shafts*) e estes se localizam nos interceptadores e a partir destes a água cai vários metros de altura para os túneis profundos. No entanto, alguns destes drop-shafts possuem comportas que limitam o fluxo de entrada, estas comportas são operadas pela MWRDGC. Foi observado que usualmente estas comportas são mantidas em um nível de abertura de 1 pé. A partir do estudo de Cantano et al (2009) foi possível estimar uma vazão limite para um poço com esta abertura, utilizou-se este limite do poço estudado relacionando-o aos outros, de acordo com suas dimensões, **Tabela 5**.



Sub-bacia ID - CDS	Area da Sub-bacia (acres)	Q(m <sup>3</sup> /h)	Com ou sem comporta	Capacidades * (m <sup>3</sup> /h)
2	273.9	39264.6704	sem	
4	393.3	56381.1423	sem	
5	241.4	34605.6643	sem	
6	609.8	87417.2911	sem	
7	563.3	80751.3284	com	360.0213
8	200.7	28771.155	com	128.27317
9	384.6	55133.9622	sem	
10	2192	314232.047	com	1400.9705
11	3266.5	468265.958	com	2087.7145
12	634.5	90958.1358	com	405.52728
13	2867.2	411024.692	com	1832.5104
14	282	40425.8381	sem	
16	83.1	11912.7204	sem	
17	401.1	57499.3038	sem	
18	325	46590.0617	com	207.71689
20	828.7	118797.49	com	529.64611
21	301.4	43206.9064	com	192.63345
22	73.3	10507.8508	com	46.848148
23	64.6	9260.67072	com	41.287726
24	2649.1	379759.176	com	1693.1163
25	290.8	41687.3536	sem	
26	151	21646.4594	sem	
28	405	58058.3845	sem	
32	373.6	53557.0678	sem	
33	25	3583.8509	sem	
34	3652.2	523557.61	com	2334.2265
36	202.1	28971.8507	sem	
39	857.6	122940.421	com	548.11694
41	1831.4	262538.581	com	1170.5007
42	913.2	130910.906	com	583.6525
43	151.6	21732.4718	com	96.89194
45	349.4	50087.9001	com	223.31163
47	168.7	24183.8259	com	107.82104
51	844.9	121119.825	com	540
53	76.6	10980.9191	com	48.957273
55	3175.7	455249.412	com	2029.6816
57	310.2	44468.4219	com	198.25778
spaulding	748.2	107257.49	sem	
homan	33.5	4802.3602	sem	
central park	11.3	1619.90061	sem	
lawndale	18.9	2709.39128	sem	
Hamlin	19	2723.72668	sem	
springfield	25.3	3626.85711	sem	

105th	11.6	1662.90682	sem	
107th	58.8	8429.21731	sem	
110th	12.5	1791.92545	sem	
116th	1780.7	255270.532	sem	

\*com comporta aberta em 1 pé

Tabela 5 – Capacidade de entrada no sistema TARP, por cada poço

O sistema foi originalmente baseado em estimativas de fluxos de tormenta para as áreas de contribuição a cada poço. Dada a extensão espacial do sistema, a distribuição de vazões de chegada varia muito espacialmente e temporalmente a cada evento.

A capacidade de transporte de um sistema de descarga é a maior que ele pode transmitir para um determinado conjunto de condições de contorno sem extravasamento em qualquer ponto do sistema. Locais críticos do sistema, cuja capacidade de transporte é reduzida são conhecidos como pontos de estrangulamento (bottlenecks). Os pontos de estrangulamento, a capacidade de transporte do sistema, e os fatores hidráulico levando a sobrecarga potencial podem variar com diferentes níveis de água e distribuição do ingresso de água (CANTAÑO et al, 2009). Por esta razão o estudo de Cantoñe et al (2009) analisou uma série de cenários com o Illinois Hydraulic Conveyance Analysis Program (ICAP) desenvolvido pela Universidade de Illinois em Urbana-Champaign . Este estudo analisou o valor encontrado para um ponto de estrangulamento do sistema e definiu este valor como a capacidade de transporte. A capacidade de transporte do sistema pode ser determinada por uma junção, seção de um tubo, que sofre sobrecarga primeiro, limitando a capacidade de fluxo, resultando em refluxo às tubulações à montante deste.

O ponto mais baixo do TARP possui uma cota de -320.3 pés, que é mais baixa do que a cota do Thorton Composite Reservoir, – 297,5 pés. Além de ser o ponto mais baixo do sistema, também é um ponto onde as intersecções são feitas em ângulos agudos, o que aumenta as perdas de carga. As perdas de carga também são aumentadas pela confluência de

tubulações de diferentes diâmetros. Todos estes fatores combinados geram uma situação muito complexa de fluxo e de perdas. Este ponto do sistema, pode ser visto na **Figura 18**, indicado por CJ, e foi o considerado, para base da capacidade de transporte.

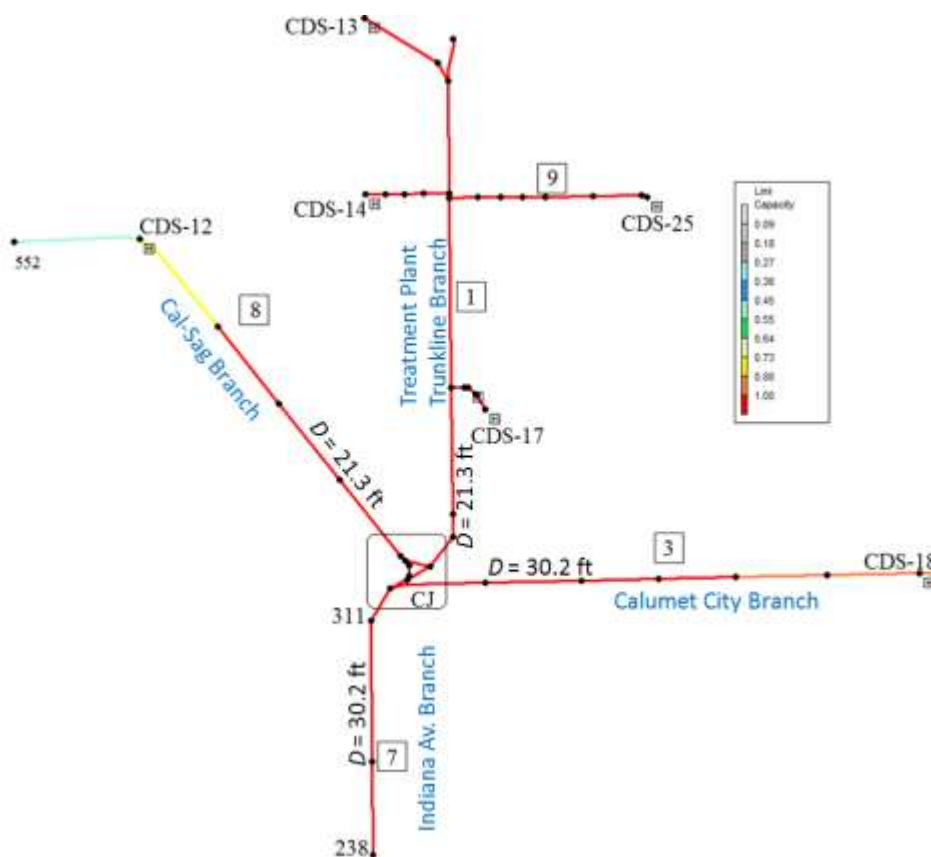


Figura 18 – Ponto de Estrangulamento (bottleneck), CJ, do sistema TARP Calumet

Fonte: Cantano et al (2009)

## 5.5 – CAPACIDADE DO SISTEMA COMBINADO DE ESGOTOS – CSS

### 5.5.1 – Capacidade de Entrada

Normalmente as entradas (inlets) ou calhas não são consideradas nos modelos, no entanto, na maioria dos casos, a capacidade dos tubos é superior a das entradas, desta forma, a hidráulica destas entradas é muito importante e pode ser um fator determinante no comportamento hidráulico do sistema (CANTONE, 2010, informação pessoal).

O comportamento hidráulico das entradas, como calhas em depressão, pode ser descrito como uma combinação de fluxos de orifício e comportamento como “barragem”. Desta forma o fluxo de entrada no CSS é uma função da altura da água a montante, assumida como a profundidade de água na calha anterior. Inicialmente o fluxo de entrada pode ser considerado como “de barragem”, como abaixo ( CANTONE, 2010, informação pessoal):

$$Q_{barragem} = CPH^{3/2} \quad (32)$$

Onde C é o coeficiente de escoamento, P é o perímetro e H é a profundidade da água.

Quando a profundidade da água começa a aumentar, a entrada fica completamente submerse, e desta forma hidraulicamente a calha funciona como um orifício.

$$Q_{orificio} = CA\sqrt{2gH} \quad (33)$$

Onde C é o coeficiente de orifício, A é a área de seção, g é a aceleração da gravidade e H é a altura da água.

Cantone (2010, informação pessoal) consultou a Neenah Foundry Company, companhia líder em fabricação de calhas, que apontou que se deve utilizar o valor mínimo calculado pelas duas equações acima para estimar o fluxo. Para estimar a capacidade de entrada na rede utilizou-se de uma calha comu redonda produzida pela Neenah Foundry Company (CANTONE, 2010, informação pessoal).

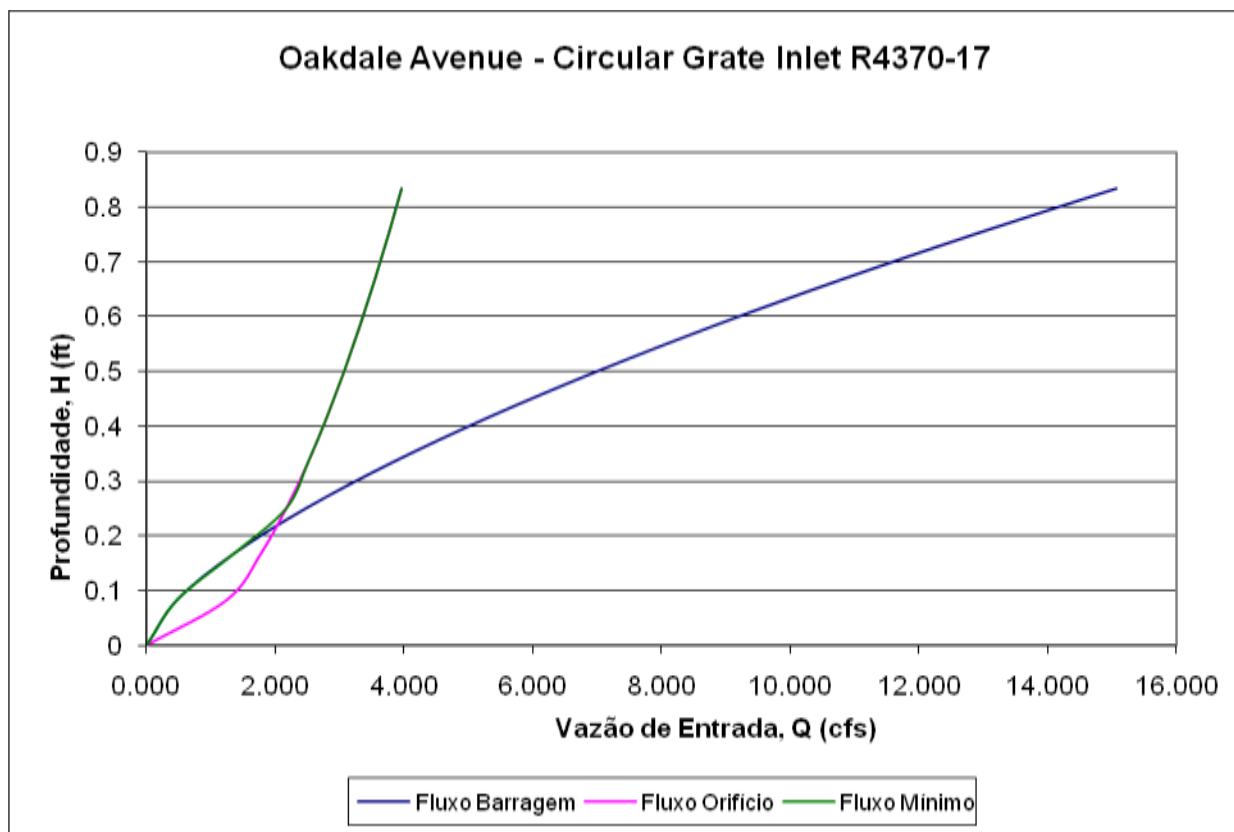


Figura 19 – Gráfico do funcionamento Hidráulico de uma calha

Fonte: Cantone (2010, informação pessoal)

A partir de dados sobre a quantidade de calhas em algumas sub-bacias foi determinada a quantidade média de calhas por área e a quantidade total de entradas, **Tabela 6**. Com o auxílio do gráfico da **Figura 19** foi determinada, para diferentes alturas, a capacidade de entrada. Chicago está substituindo as sua calhas, por calhas que não permitam o retorno e também que permitam um fluxo mais lento da água da chuva, esta medida foi tomada visando a diminuição das enchentes tipo II (CSO II) dos porões das residências, no entanto é necessário avaliar as consequências desta nas enchentes tipo I (CSO I) nas ruas.

Sub-bacias ID - CDS	Área das Sub-bacias (m2)	Entradas/ calhas (metálicas)	Entradas/Área
11	13219068	5341	0.000404
12	2567733	1041	0.000405
13	11603157	4857	0.000419
14	1141215	452	0.000396
16	336294.1	138	0.00041
20	3353633	639	0.000191
25	1176827	178	0.000151
26	611075.9	265	0.000434
28	1638978	470	0.000287
32	1511907	663	0.000439
33	101171.5	55	0.000544
36	817870.4	229	0.00028
homan	135569.8	70	0.000516
central park	45729.52	26	0.000569
lawndale	76485.65	38	0.000497
Hamlin	76890.34	32	0.000416
springfield	102385.6	32	0.000313
105th	46943.58	22	0.000469
107th	237955.4	99	0.000416
110th	50585.75	10	0.000198
116th	7206244	2372	0.000329
Área Total - Calumet	$1.34 \cdot 10^8$	51597.89	0.000385

Tabela 6 - Quantidade de entradas por sub-bacias e estimativa do total

### 5.5.2 – Capacidade de Transporte

Para a determinação da capacidade de transporte do sistema combinado (CSS) utilizou-se a fórmula de Manning. Foram considerados os diâmetros de 86 tubos do sistema combinado que chegam nos interceptadores, admitindo-se uma declividade média das tubulações (a partir dos dados disponíveis) e coeficiente de Manning igual a 0,0012, **Tabela 7**.

Esta capacidade é determinante na ocorrência de enchentes de porões (CSO II) no entanto este é um efeito mais localizado, pois dependendo do diâmetro das tubulações em certo local, ocorre o refluxo de água e esgotos aos porões das residências desta área. Portanto,

nesta pesquisa, além de avaliar o todo, serão feitas estimativas para áreas menores, com tubulações de capacidades menores.

<b>Raio (m)</b>	<b>Q-Manning (m<sup>3</sup>/h)</b>
2.754	1823.300
0.720	50.935
2.394	1254.996
1.545	390.187
1.140	173.464
1.440	323.417
0.900	92.351
1.350	272.283
1.080	150.174
0.630	35.676
0.990	119.076
0.360	8.022
0.630	35.676
0.720	50.935
0.450	14.544
0.270	3.725
0.450	14.544
0.450	14.544
0.540	23.651
1.080	150.174
1.440	323.417
1.170	185.906
0.630	35.676
0.810	69.731
0.720	50.935
0.720	50.935
0.810	69.731
0.720	50.935
0.720	50.935
0.720	50.935
0.810	69.731
0.720	50.935
0.630	35.676
1.620	442.762
0.540	23.651

0.900	92.351
0.405	10.982
0.405	10.982
0.405	10.982
0.405	10.982
0.405	10.982
0.405	10.982
0.720	50.935
0.540	23.651
1.440	323.417
1.170	185.906
0.810	69.731
0.900	92.351
0.990	119.076
0.900	92.351
0.810	69.731
0.990	119.076
0.720	50.935
0.180	1.263
0.540	23.651
0.360	8.022
0.900	92.351
1.620	442.762
0.630	35.676
0.810	69.731
0.225	2.291
1.350	272.283
1.260	226.526
1.260	226.526
1.170	185.906
0.450	14.544
0.360	8.022
0.450	14.544
0.180	1.263
0.360	8.022
0.450	14.544
0.720	50.935

0.315	5.619
0.720	50.935
0.540	23.651
0.450	14.544
1.260	226.526
0.405	10.982
0.630	35.676
0.720	50.935
0.450	14.544
0.540	23.651
0.630	35.676
1.440	323.417
1.440	323.417
3.825	4376.704
<b>Total Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	1.076E+04
<b>Total Q/Área (m/s)</b>	8.023E-05

Tabela 7 – Diâmetros das tubulações do CSS e Vazões calculadas

## 5.6 – ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DO SISTEMA COMBINADO

As capacidades da Estação de Tratamento de Efluentes do Sistema Combinado (Waste-Water Treatment Plant – WWTP) foram obtidas a partir de dados da própria estação. A Estação possui fluxo médio de 55.834,65 m<sup>3</sup>/h e capacidade máxima proposta de 67.821,75 m<sup>3</sup>/h, e uma capacidade superior, que no entanto é insustentável, mas acaba sendo levada ao limite em eventos de tormentas muito fortes: 78.862,5 m<sup>3</sup>/h. A capacidade de bombeamento do TARP para a WWTP é de 19.715,70 m<sup>3</sup>/h.

## 5.7 – FLUXO SANITÁRIO

Os dados relativos ao fluxo sanitário (fluxo de esgotamento sanitário, proveniente das residências, comércio) utilizados são provenientes de um estudo feito por Christopher B. Burke Engineering LTDA. para a U.S. Army Corps of Engineers efetuado em Junho de 1999. Foi utilizado o modelo hidrológico HSPF-SCALP, que foi calibrado a partir de dados observados entre Outubro de 1982 a Setembro de 1993. A partir destes, atualizou-se a população em cada sub-bacia e obteve-se um valor de carga, para a área com sistema combinado de esgotos, 245 pés<sup>3</sup>/s, e um valor para a área que possui sistema separado de esgotos e água pluvial, no qual o valor de carga sanitário é 302 pés<sup>3</sup>/s. Este valor de carga deve ser multiplicado pelos coeficientes indicados na **Tabela 8**, em relação ao mês, dia da semana e hora do dia.



<b>Janeiro</b>	<b>Fevereiro</b>	<b>Março</b>	<b>Abril</b>	<b>Maio</b>	<b>Junho</b>	
0.92	0.94	1.03	1.04	1.04	1.08	
<b>Julho</b>	<b>Agosto</b>	<b>Setembro</b>	<b>Outubro</b>	<b>Novembro</b>	<b>Dezembro</b>	
1.10	1.09	1.01	0.93	0.92	0.90	
<b>Domingo</b>	<b>Segunda</b>	<b>Terça</b>	<b>Quarta</b>	<b>Quinta</b>	<b>Sexta</b>	<b>Sábado</b>
0.93	1.00	1.03	1.05	1.03	1.00	0.96
<b>1h</b>	<b>2h</b>	<b>3h</b>	<b>4h</b>	<b>5h</b>	<b>6h</b>	
0.72	0.71	0.70	0.70	0.71	0.88	
<b>7h</b>	<b>8h</b>	<b>9h</b>	<b>10h</b>	<b>11h</b>	<b>12h</b>	
1.04	1.12	1.14	1.14	1.15	1.17	
<b>13h</b>	<b>14h</b>	<b>15h</b>	<b>16h</b>	<b>17h</b>	<b>18h</b>	
1.16	1.16	1.16	1.14	1.14	1.12	
<b>19h</b>	<b>20h</b>	<b>21h</b>	<b>22h</b>	<b>23h</b>	<b>24h</b>	
1.10	1.07	1.03	0.98	0.90	0.86	

Tabela 8 – Coeficientes relativos à variação temporal da carga sanitária

## 5.8 – RELAÇÃO ENTRE CSOs E PRECIPITAÇÃO

De acordo com os dados fornecidos pelo Metropolitan Water Reclamation District of Greater Chicago –MWRDGC, ocorreram 11 eventos de extravasamento (CSOs) no ano hidrológico de 2008 (outubro/2007 a setembro/2008) na área de Calumet, estes eventos estão relacionados aos eventos de chuva; intensidade e volume. Os dados relativos aos CSOs são, na realidade relativos ao CSO III, que se referem a incapacidade de entrada e de transporte do TARP, a ocorrência destes está ligada as comportas e poços de entrada ao TARP (*drop-shafts*). Estes dados são medidos quando ocorre saída do sistema TARP para os rios. Quando as comportas se abrem, um dispositivo mede quanto tempo estas ficaram abertas, no entanto estes dados podem conter erros, como por exemplo, quando um pedaço de pau ou uma pedra fica presa na comporta, mantendo-a aberta, e também, não são um bom parâmetro por não medirem o volume. Outros tipos de extravasamentos foram pensados em vista de algumas reportagens e documentações do ano de 2001, identificando aproximadamente o grau da enchente, número de casas com porões alagadas e problemas no tráfego de veículos.

O gráfico na **Figura 20** relaciona a precipitação horária com a ocorrência de CSOs III que estão indicados no horário em que se iniciam com um risco vermelho, no ano hidrológico de 2008 ocorreram 11 eventos de extravasamentos.

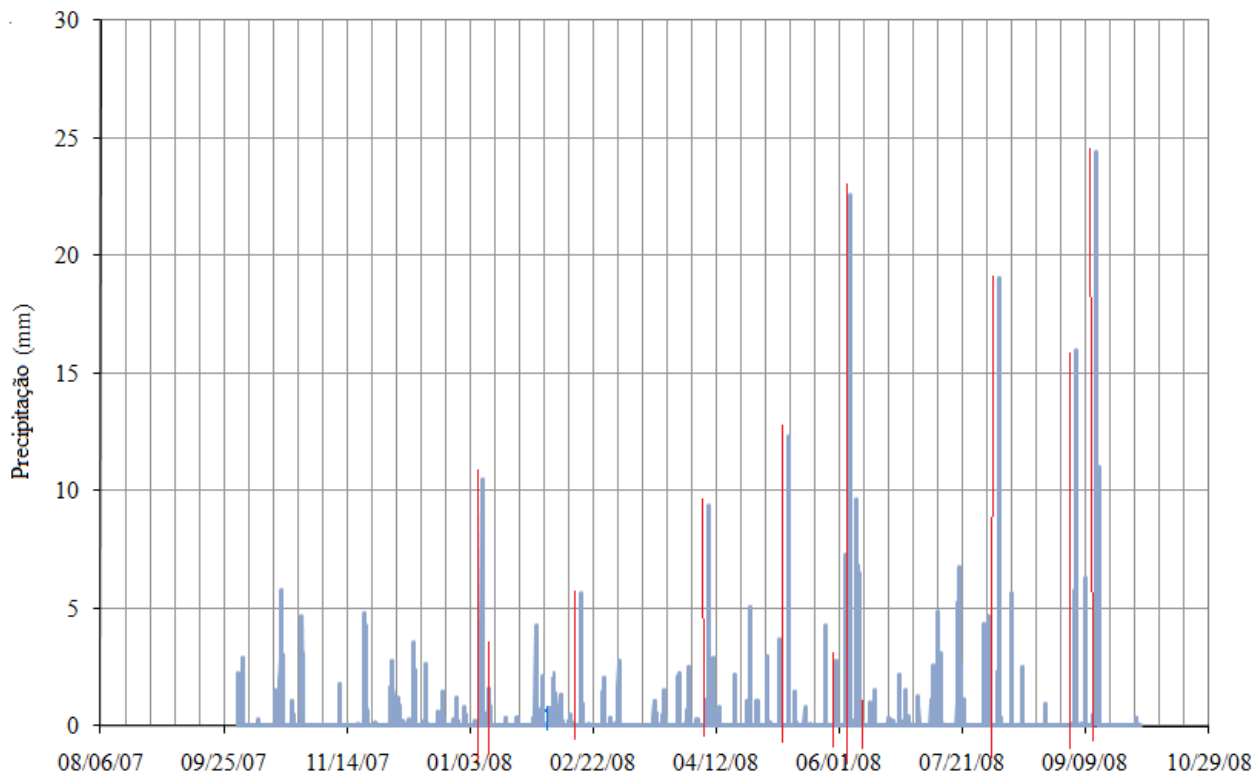


Figura 20–Precipitação horária com indicação da ocorrência de CSOs, 2008

Os CSOs estão relacionados com as comportas/poços. De um modo a analisar a frequência, intensidade e importância dos eventos de CSO, foi utilizado o número de comportas afetadas por evento e a duração média de cada CSO por comporta, foi feita uma correlação entre eles e o pico de intensidade e o volume das chuvas de um certo evento que ocasionou o CSO.

Os eventos de CSO variam muito, existem alguns eventos de pequeno porte, onde apenas uma comporta relata CSO e de pequena duração, entre 7 a 30 minutos. Existem também outros eventos que ocorreram em apenas algumas comportas, a partir de duas a cinco, mas os períodos, nestes casos são maiores, variando de 80 a 570 min. Estes pequenos

eventos que ocorreram em algumas comportas, são provavelmente eventos mais localizados, sendo uma resposta a uma forte precipitação em uma determinada área, ou mais relacionados a uma menor capacidade de entrada no sistema TARP em algumas comportas.

Estes dados são apresentados pela **Tabela 9**, assim como na forma de gráficos, **Figura 21 e Figura 22**

Pico de Intensidade de Chuva (mm/h)	Volume de Chuva (mm)	No. de comportas, onde ocorreu CSO	Duração média do CSO por comportas (min)
7,28	13,50	1.00	7,23
19,05	40,34	1.00	15,55
9,65	13,34	1.00	19,45
2,24	25,15	1.00	30,00
22,61	29,42	2.00	84,13
1,61	7,70	3.00	564,18
5,63	19,73	4.00	374,28
12,32	44,79	5.00	517,35
16,00	85,98	17.00	592,32
10,50	63,58	18.00	828,41
24,43	192,57	25.00	2903,18

Tabela 9 - Eventos de CSO em relação a eventos de chuva e drop shafts

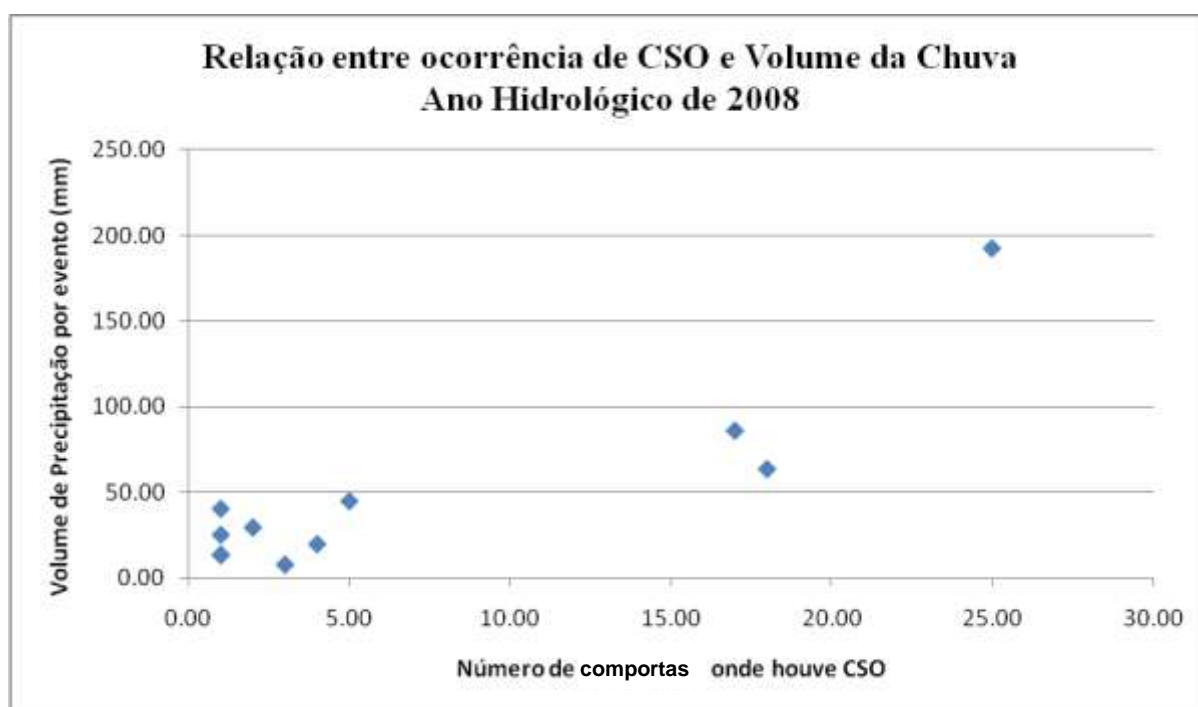


Figura 21 – Relação entre ocorrência de CSO e Volume da Chuva

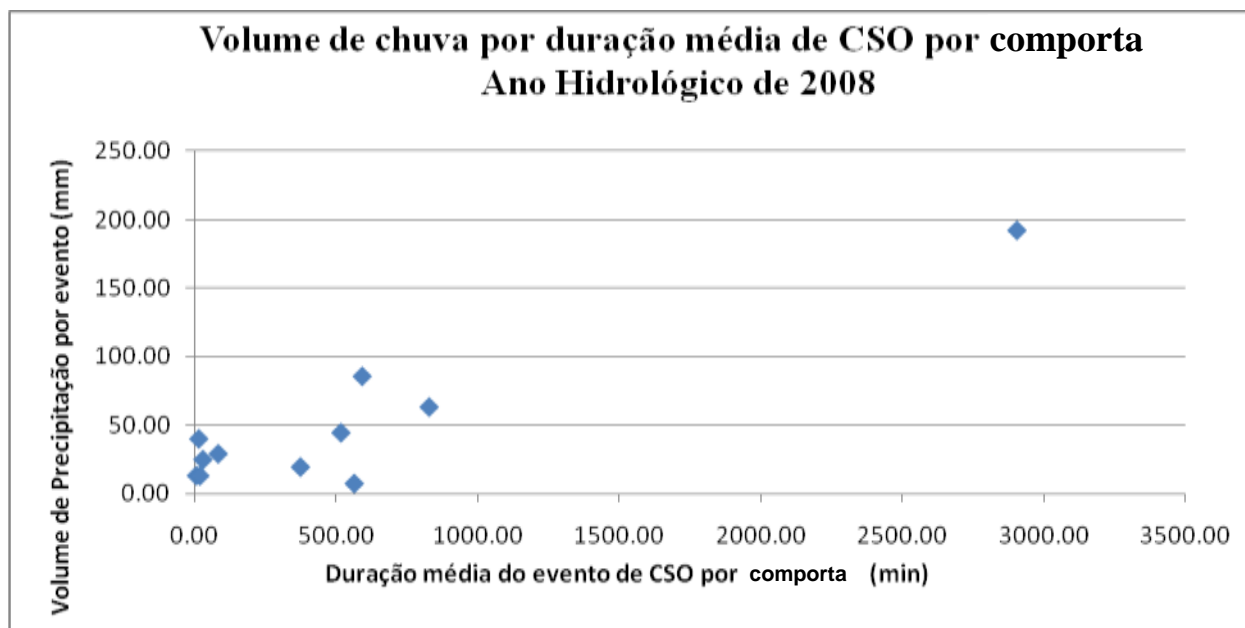


Figura 22 - Volume de chuva por duração média de CSO por comporta

Com base no volume de chuva por evento em que ocorreram CSOs em 2008; houve uma grande chuva com quase 200 milímetros que gerou o maior evento de CSO, com ocorrência em 25 comportas e que possuiu uma duração média de aproximadamente 2900 minutos (mais de dois dias) por drop shaft. A duração média por comporta foi realizada pela média de durações em todas as comportas em que ocorreu CSO em dado evento.

Ocorreram também dois outros eventos críticos, com volume de chuvas entre 50 e 100 milímetros (64 e 86 mm), quando houve um número considerável de comportas que relataram CSOs, e a duração média por comporta foi de 600 e 830 minutos. Estes foram as três maiores tempestades em volume e os três maiores eventos de extravasamentos reportados. As chuvas com volumes inferiores a 50mm produziram CSOs menores, onde apenas um a cinco comportas reportaram ocorrência de CSOs, com médias de duração de apenas 7 a 560 minutos.

Um evento de extravasamento que ocorre em um número pequeno de comportas pode ser referente a três causas, ou a combinação destas:

- uma chuva intensa e localizada a uma pequena área;
- uma capacidade de entrada do TARP restrita em algum poço;
- um problema de operação nas comportas de entrada aos poços e ao TARP.

Já um evento de ocorrência de CSOs em diversas comportas é relativo a uma chuva espacialmente mais distribuída, assim como representa um evento de extravasamento mais significativo do ponto de vista global do sistema.

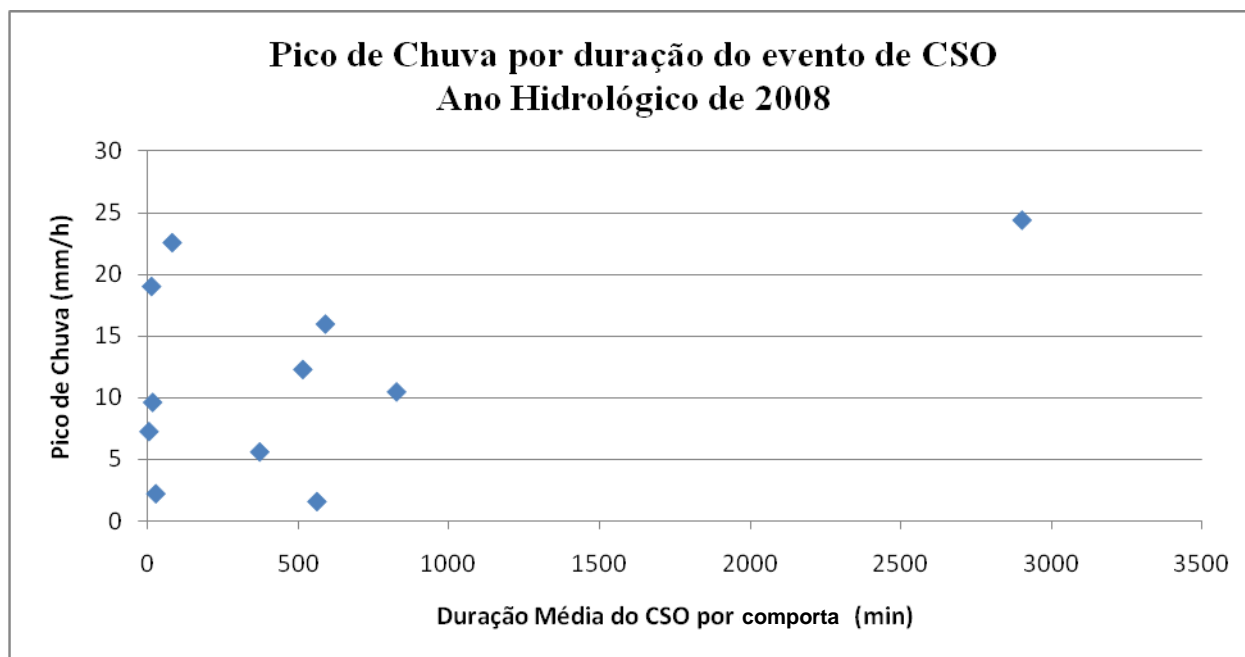


Figura 23 - Pico de Chuva por duração do evento de CSO

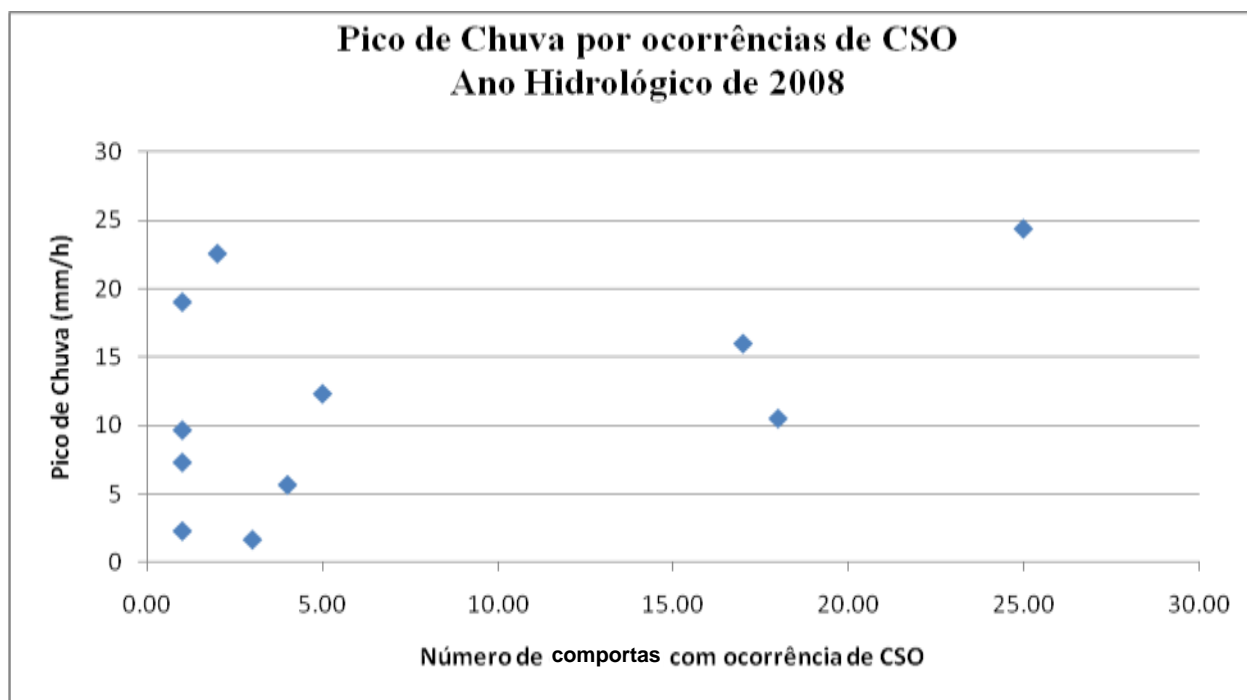


Figura 24 - Pico de chuva por ocorrências de CSO

De acordo com as **Figura 23** e **Figura 24**, há duas chuvas com picos fortes, mas que, no entanto, apresentam pequenos CSOs, que são os picos de aproximadamente 19 mm/h, que gerou um CSO relativo a apenas uma comporta e um pico de aproximadamente 22 mm/h que gerou CSO relativo a duas comportas. Estas chuvas foram rápidas e intensas, o que explica a ocorrência de CSO, no entanto um CSO localizado e de curta duração

Estes eventos podem ser explicados, pois apesar destas chuvas terem alta intensidade, apresentam apenas um pico, são chuvas de pequena duração, o que explica a ocorrência do CSO localizado e com curta duração. Os outros eventos com picos menores que 10 mm/h, foram responsáveis por CSOs menores, ocorrência em 1-5 comportas e duração média inferior a 500 minutos. O evento que teve CSO em 5 comportas e duração um pouco superior a 500min, não foi relacionado a um pico, mas a uma duração longa de chuva e um volume de 45mm.

O gráfico abaixo, **Figura 25**, apresenta os eventos de CSO que ocorreram em 2008, com o número de comportas afetadas e a duração média em cada evento.

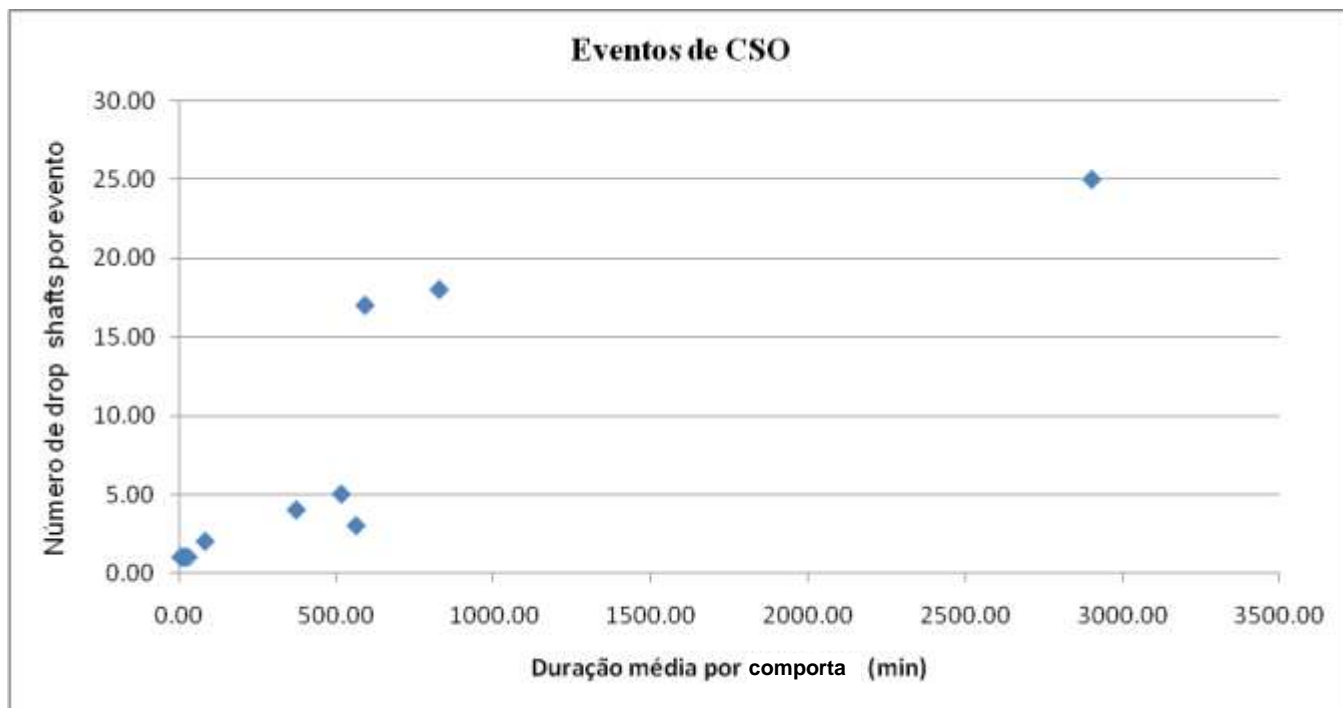


Figura 25- Eventos de CSO

## **6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Uma verificação foi realizada para o CSO III, a partir dos dados do item 5.8, ou seja dados quantitativos sobre a ocorrência de extravasamentos em comportas: o número de comportas afetadas por evento e a duração do extravasamento por comporta afetada.

Em relação ao CSO IV, utilizou-se os dados de capacidade do TARP, não houve verificação. Para os CSO I e CSO II, utilizou-se as capacidades descritas pela Análise de Dados, 5.5, no entanto foi feita uma verificação e adaptação com base em registros de jornais e artigos sobre as inundações de ruas e de porões, do ano de 2001.

Em relação ao CSO I e II, baseado nos dados de Changnon e Westcott (2002) em 2001 ocorreram oito eventos críticos, número único de chuvas em relação a todos os registros para Chicago. No entanto, nem todos os eventos ocorreram na área de estudo em questão: Calumet. Os valores máximos de precipitação foram superiores a 120mm em dois eventos, mas as durações destas tempestades foram curtas; todos os eventos (8) foram de curta duração. Na maioria das chuvas os postos pluviométricos não receberam quantidades superiores do que uma chuva com recorrência superior a dois anos.

O maior nível ocorreu em 02 de Agosto, em que uma chuva de duração de duas horas, atingiu em 19 dos 25 postos pluviométricos, valores entre 2 a 10 anos de recorrência, um posto atingiu valor superior a uma chuva de 100 anos, e em três recorrência foi de 25 anos. Com excessão das chuvas de 21 de Julho, 02 de Agosto e 30 e 31 de Agosto as quantidades de chuva não excederam a recorrência de 2 anos a 10 anos. As chuvas de 02 e 30 a 31 de Agosto atingiram a área Calumet, provocando enchentes de rua e de porões.



A chuva de 02 de Agosto de 2001 foi a mais intensa. Em poucas horas, as sete Estações de Tratamento de esgoto combinado estavam operando com capacidade, assim como o sistema TARP, fazendo-se necessária a liberação de uma grande quantidade de água poluída aos rios. Após a primeira hora de chuva, ocorriam enchentes nas principais vias de acesso e ruas, o tráfego ficou intenso e os trens tiveram de interromper o serviço (Chicago Tribune, 2001a apud Changnon e Westcott, 2002). Mais de 300.000 porões foram inundados (Chicago Tribune, 2001b apud Changnon e Westcott, 2002), houve interrupção da transmissão de energia elétrica e de voos do aeroporto O'Hare. O governador declarou o condado Cook como área de desastre para ser elegível a fundo federal. Outra chuva muito alarmante em 2001 foi a de 30-31 de Agosto, também com alta intensidade de alagamentos, de inundações em porões, término de energia elétrica e interrupção de vôos. Estas duas chuvas tiveram início na parte sul da cidade, na área de estudo.

Em relação à verificação do CSO III (enchentes devido a capacidade de entrada e de transporte do TARP) foram utilizados os dados já discutidos anteriormente no item 5.8, para o ano de 2008. Foi feita a verificação também com os dados relativos aos anos de 2006 e 2007.

A seguir tem-se os gráficos do CSO tipo III, a **Figura 26** é referente às precipitações ao longo do tempo, nos anos de 2006 e 2007. A **Figura 27** mostra os CSO III, em relação ao tempo. Estes registros podem conter erros, como já discutido, pois são relativos à abertura das comportas para liberação do efluente do TARP aos cursos de água, que podem ter sido obstruídas por algum material arrastado pela chuva, comprometendo os resultados, ou também devido a incongruências nos registros e na compilação dos dados de CSOs. Estes dados também não medem o volume de CSO, mas sim aonde o CSO ocorreu, ou seja, em qual drop shaft e por quanto tempo. Estes valores foram utilizados para identificar uma certa

intensidade. A **Figura 28** apresenta a ocorrência de CSOs em relação à multiplicação do número de comportas afetadas pela duração média de ocorrência de liberação de água por cada comporta.

Através destes gráficos é possível observar uma relação, como a apresentada anteriormente para o ano de 2008, mas agora para os anos de 2006 e 2007, entre precipitação e ocorrências de CSO, tanto para os registros de CSOs como para os simulados pelo modelo. O modelo apresenta para 2006 e 2007, **Figura 27**, praticamente os mesmos extravasamentos (CSOs) do que os observados pelos registros, **Figura 28**.

É possível, também, ver uma relação entre as intensidades de CSO dos registros e as calculadas pelo modelo, lembrando que elas estão representadas por grandezas completamente distintas. No entanto é possível observar que os eventos de CSOs de maior importância, e portanto, não localizados, estão presentes no modelo.

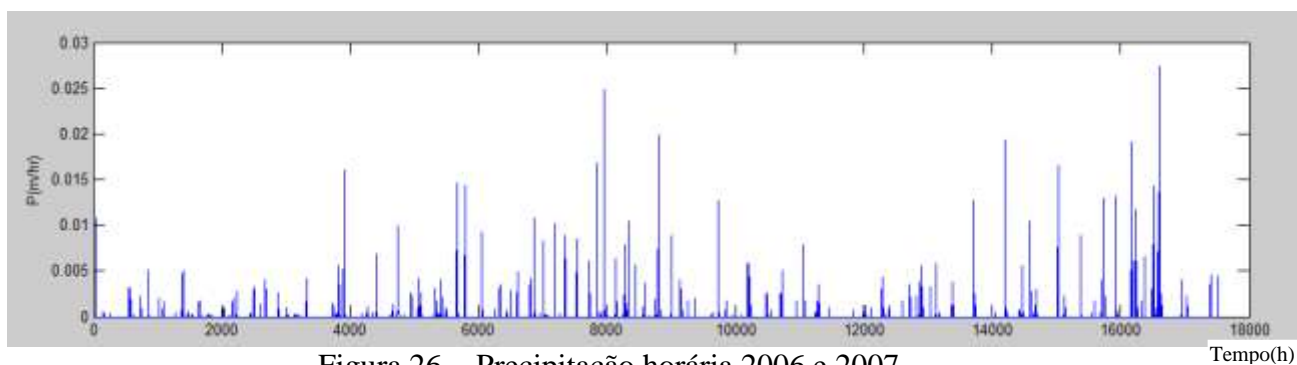


Figura 26 - Precipitação horária 2006 e 2007

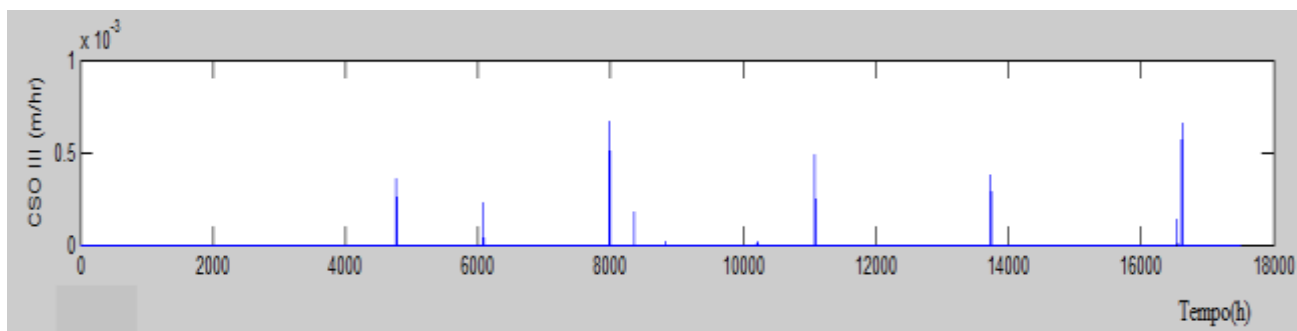


Figura 27 - CSO III modelados por hora

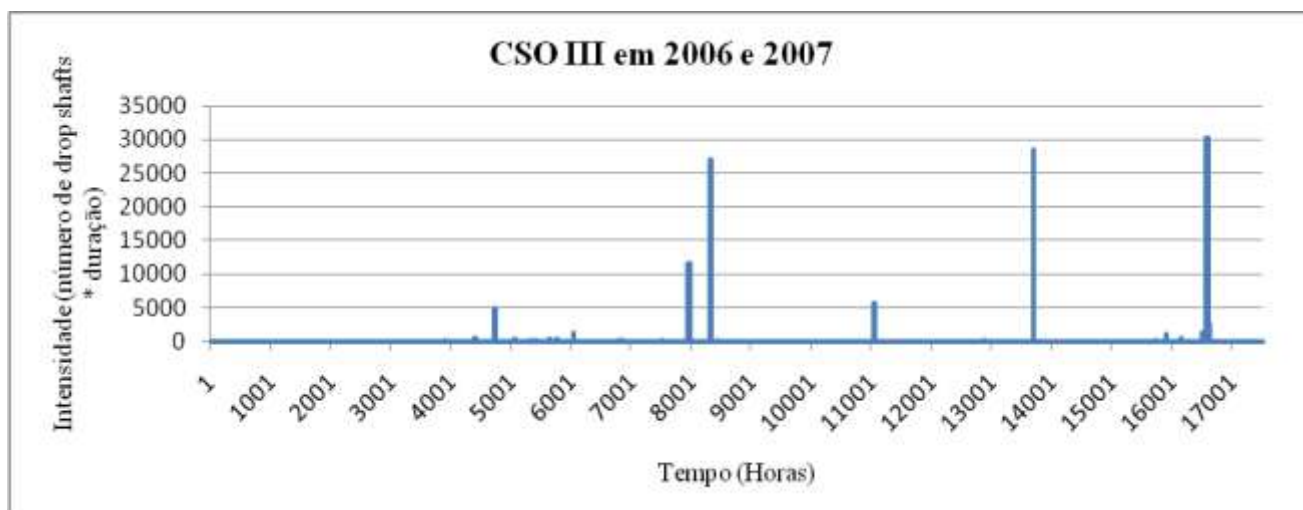


Figura 28 - CSOs III Observados

Os resultados do modelo para os anos hidrológicos de 2001 a 2006 são apresentados a seguir, e no Anexo 1. Os resultados seguem o padrão encontrado de precipitação e eventos de CSO discutidos anteriormente. Ou seja, existe uma relação entre a intensidade e volume de chuva com a intensidade e ocorrência de enchentes - CSOs.

O modelo mostrou-se satisfatório por conseguir incorporar a relação encontrada entre volume de chuva e ocorrência de CSOs registrados. É um modelo simplificado, que talvez não apresente um alto grau de precisão, mas que pode ser um bom instrumento para a identificação de problemas, investigação sobre as enchentes urbanas e análise das esferas mais importantes e urgentes a serem alertadas. Estes resultados podem ser úteis, em ordem de grandeza, no caso de Chicago, que não possui nenhuma quantificação sobre o total de volume de água combinada que chega aos corpos de água, dado importante para a qualidade de água dos rios e lago ao entorno da cidade.

Primeiramente segue o gráfico de precipitação horária, **Figura 29**, que pode ser relacionado aos eventos de CSOs:

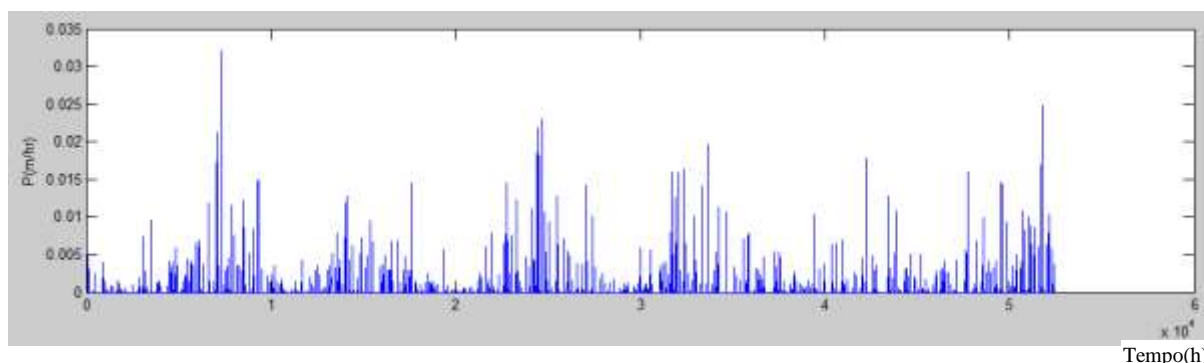


Figura 29 - Precipitação horária de 2001 a 2006

Os CSOs são mostrados nas **Figura 30** a **Figura 32**. O CSO IV não ocorreu na simulação, ou seja, com a capacidade atual que os túneis e reservatório possuem, há capacidade suficiente na situação presente para que não ocorram extravasamentos deste tipo. Na realidade isto indica um problema, pois estão ocorrendo os outros três tipos de CSO. O CSO III ocorre, na maioria dos casos, por erro de operação do sistema, pois as comportas dos poços ficam abertas em uma certa posição, no entanto estão limitando o fluxo de entrada ao TARP. No entanto, há outro problema também no sistema TARP, que é o ponto de estrangulamento com cota inferior ao reservatório, o que limita a capacidade de transporte do sistema. Recomenda-se uma melhor revisão e operação do sistema TARP, principalmente das comportas, para que sejam reduzidos os CSO III, e desta forma a contaminação dos cursos de água de Chicago.

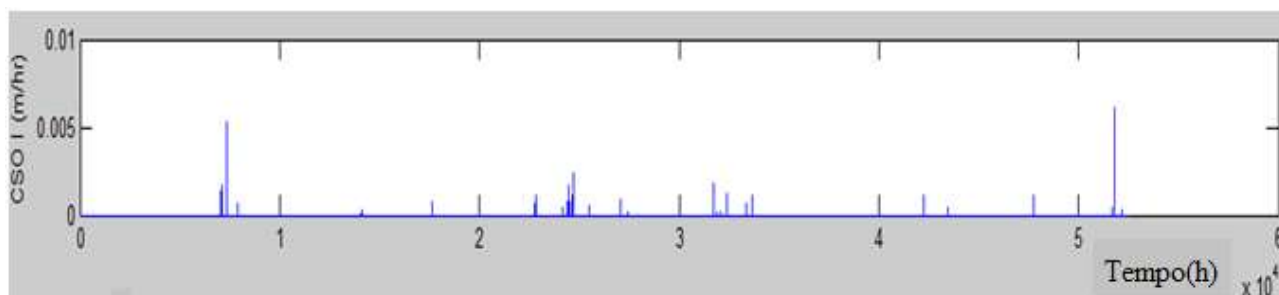


Figura 30 – CSO I: Ocorrência e Vazões

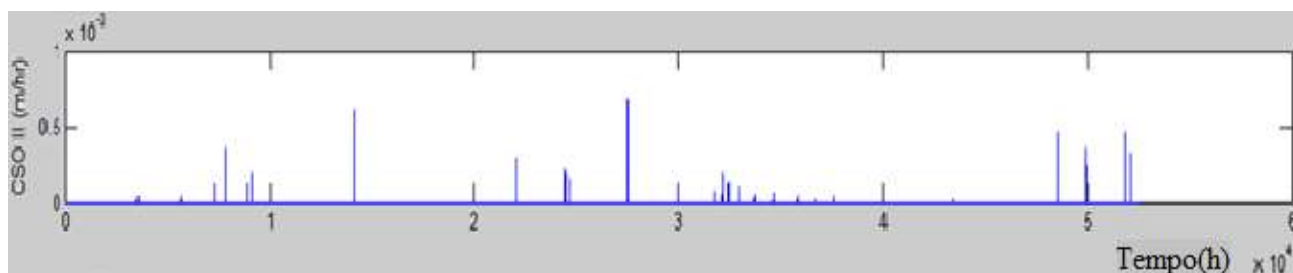


Figura 31 – CSO II: Ocorrência e Vazões

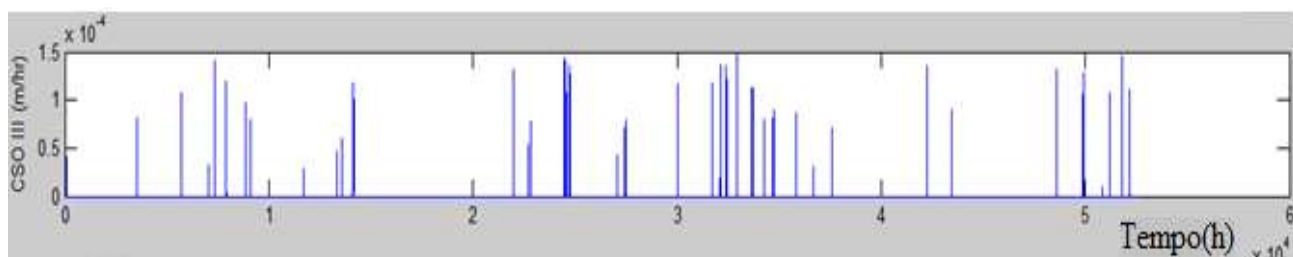


Figura 32 - CSO III: Ocorrência e Vazões

Na **Figura 33** apresenta-se a variação da vazão pelo tempo do efluente de saída do sistemas combinado de esgotos e água pluvial (CSS), este efluente vai para a planta de tratamento – WWTP, ou para o TARP. Caso não haja capacidade de entrada no TARP este efluente vai para os cursos de água. Na sequência, segue a vazão de entrada no TARP e variação volumétrica do TARP, **Figura 34** e **Figura 35**, que demonstram a imensa importância do TARP no sistema de Chicago.

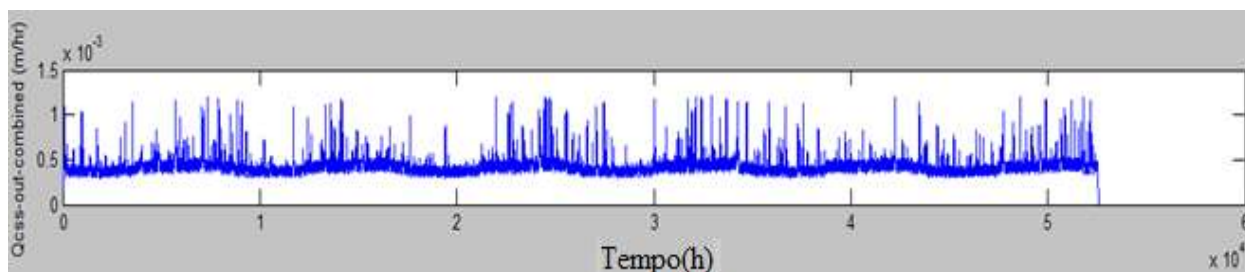


Figura 33 – Vazão de Saída do CSS

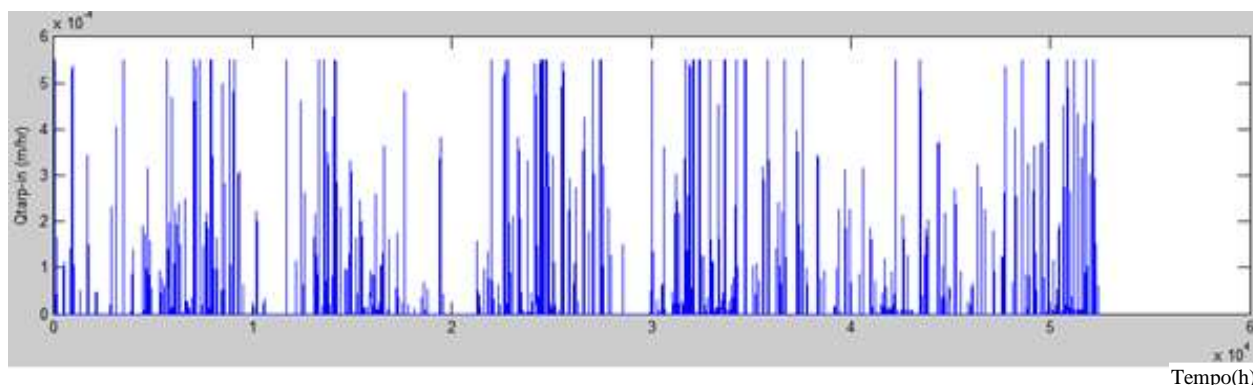


Figura 34 – Vazão de Entrada no TARP

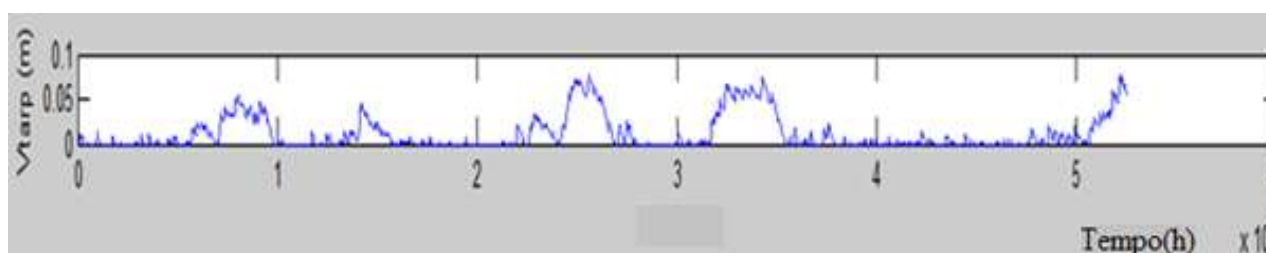


Figura 35 – Variação volumétrica do TARP

Como já foi discutido, os CSOs do tipo I e II, na realidade, ocorrem de forma mais localizada, dependendo da declividade de uma região e da quantidade e capacidade de entradas ao sistema na área, e da capacidade dos tubos do sistema combinado, sendo que em certas áreas a capacidade destes tubos é restrita, levando a recorrentes CSOs II em áreas específicas.

De forma a tentar avaliar este processo, utilizou-se, ao invés do valor total das capacidades de vazão para todas as tubulações, um valor equivalente ao de uma tubulação com diâmetro superior a 18,6% dos diâmetros das tubulações do sistema combinado, ou seja um valor superior a quase 20% das tubulações. Este valor foi utilizado, dada a equivalência para toda a área, como o valor de capacidade máxima de transporte do sistema combinado, CSS.

O gráfico abaixo, **Figura 36**, mostra que, com esta capacidade, ocorreriam muito mais eventos de CSO II, ou seja, a quantidade e frequência de porões inundados seria muito

superior. Neste cenário os outros tipos de CSO não ocorrem, pois a capacidade restritiva é encontrada no transporte do sistema CSS. Estes resultados sugerem que o problema de inundações de porões é comum em diversas localidades, cerca de 20% das tubulações, e cerca de 20% da área. Os CSO II são graves, pois além de causarem transtorno e preocupação à população, introduz o efluente do sistema combinado de esgotos no interior das casas e estabelecimentos.

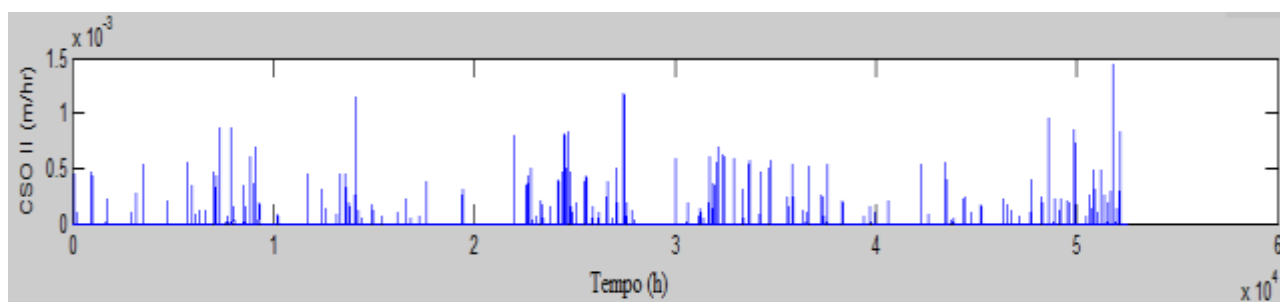


Figura 36 – CSO II com capacidade de transporte do CSS, relativa a 20% da área.

Foi feita também uma análise em relação à capacidade de entrada e transporte do TARP. Assumiu-se esta capacidade como a capacidade de entrada do TARP sem restrições em relação à comportas dos poços. A ocorrência de todos os CSOs são praticamente extintas nos seis anos, apenas com uma ocorrência de CSO I e duas de CSO IV. Claramente, esta capacidade não atingirá sempre este valor, dadas as restrições operacionais do sistema. Contudo, mostra que há necessidade de melhoria na operação do sistema TARP, principalmente em sua entrada e operação das comportas, e que há capacidade suficiente para reduzir, e muito, a ocorrência de CSOs na área Calumet, como pode ser visto na **Figura 37**.

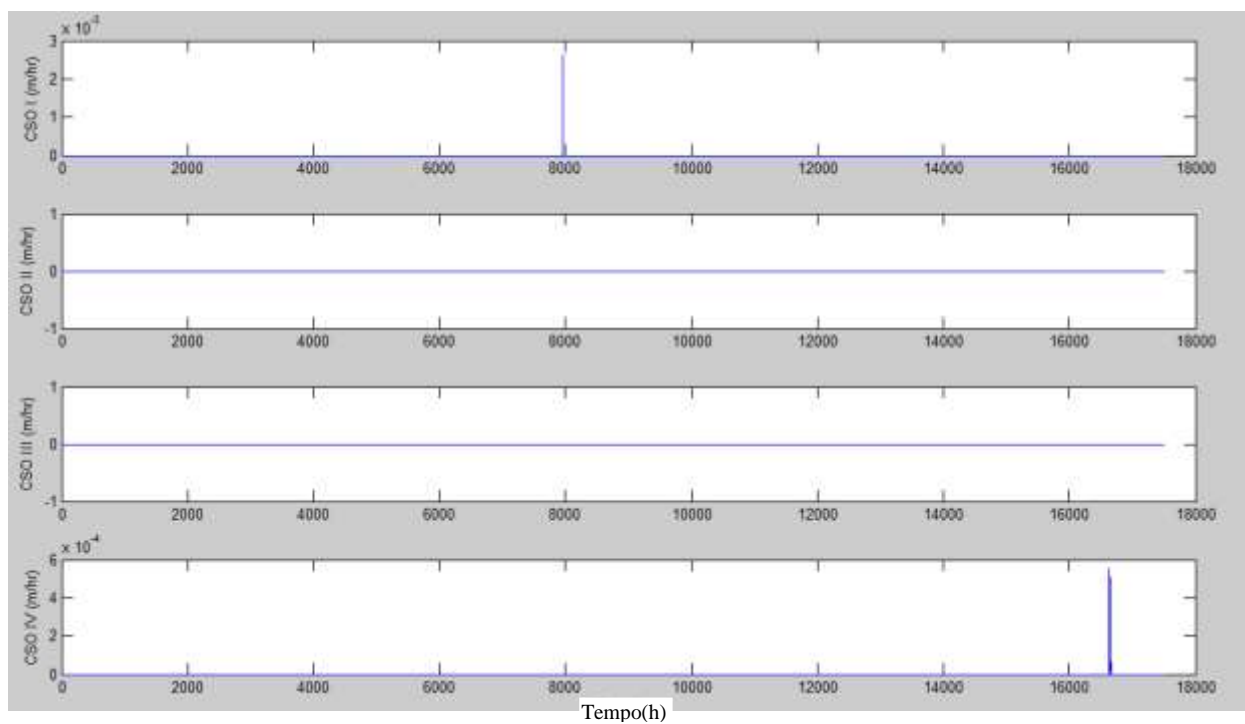


Figura 37 – CSOs com capacidade máxima de entrada no TARP



## 7 – CONCLUSÕES

O modelo mostrou-se satisfatório, apresentando uma boa análise do efeito global do comportamento da hidrologia urbana de Chicago. Pode ser um bom instrumento para a identificação de problemas e investigação sobre as inundações urbanas e análise das esferas mais importantes e urgentes a serem alertadas.

Estes resultados podem ser úteis no caso de Chicago, que não possui nenhuma quantificação sobre o volume total de água/esgoto que chega aos corpos de água, dado importante para a qualidade de água dos rios e lago no entorno da cidade, além de indicarem problemas no sistema, como por exemplo na operação do sistema TARP.

Este modelo não possui uma grande precisão para previsão, mas sim é um bom modelo para a identificação de problemas, para a análise do sistema e como suporte ao planejamento urbano, provendo uma boa idéia do funcionamento do sistema e de identificação de problemas.

As durações dos eventos de CSOs, principalmente os CSOs III, apresentam um tempo de duração superior em relação aos dados de registro, algo que deve ser analisado com cuidado e melhorado no modelo.

O modelo apresenta-se como um bom modelo simplificado e não necessita de muitos dados, fazendo-se um modelo muito interessante a países em desenvolvimento, como o Brasil.

## 8 - BIBLIOGRAFIA

- American FactFinder, United States Census Bureau. [http://factfinder.census.gov/servlet/QTTable?\\_bm=y&-geo\\_id=16000US1714000&-qr\\_name=DEC\\_2000\\_SF1\\_U\\_DP1&-ds\\_name=DEC\\_2000\\_SF1\\_U&-\\_lang=en&-redoLog=false&-\\_sse=on](http://factfinder.census.gov/servlet/QTTable?_bm=y&-geo_id=16000US1714000&-qr_name=DEC_2000_SF1_U_DP1&-ds_name=DEC_2000_SF1_U&-_lang=en&-redoLog=false&-_sse=on). Acesso 06/2010.
- AUCH, R.; TAYLOR, J.; ACEDO, W. (2003). "Urban Growth in American Cities Glimpses of U.S. Urbanization". U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. Circular 1252.
- BERZ, G. "Flood Disasters: Lessons From the Past – Worries for the Future" in *Symposium on River Flood Defense, Kassel: Herkules Verlag, 2000, V.2, pp. F1-F10*.
- BHADURI, B.; MINNER M.; TATALOVICH, S. e HARBOR, J. (2001). "Long-Term Hydrologic Impact of Urbanization: A Tale of Two Models". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127 (1), pp. 13-19.
- BOLDRIN, R. S. (2005). *Avaliação de cenários de inundações urbanas a partir de medidas não-estruturais de controle: trecho da bacia do córrego do Gregório*. Dissertação de Mestrado. EESC – USP São Carlos-SP.
- BURTON, M. L.; HICKS, M. J. (2005). "Hurricane Katrina: Preliminary Estimates of Commercial and Public Sector Damages". Center for Business and Economic Research Marshall University. United States. pp.1-12.
- CANTONE, J. P.; Schimidt, A. R.(2007). *Potential Dangers of Simplifying Combined Sewer Hydrologic/Hydraulic Models using Subcatchment Aggregation and Conduit Skeletonization*. *Journal of Hydrologic Engineering*. 14 6, pp. 596-605 (2009)
- CANTONE, J. P.; SEO, Y; ZIMMER, A; SCHIMIDT, A.R.; GARCÍA, M. H. (2009). *Hydrologic Modeling of the Calumet TARP System Tunnel and Reservoir Plan, Report3*, University of Illinois at Urbana-Champaign, October 2009.
- CANTONE, J. P. (2010). Mensagem recebida por email e discussão no mês de março de 2010. Informação pessoal.
- CATAÑO-LOPERA, Y, OBERG, N.; JEONG-CHOI, N.; GARCIA, M.H. (2009) *Hydraulic Conveyance Analysis of the Calumet TARP System, Tunnel and Reservoir Plan, Report 1*, University of Illinois at Urbana-Champaign, October 2009.
- CENSUS 2000. <<http://www.census.gov/main/www/cen2000.html>>. U.S. Census Bureau. Acesso 06/2010.

CHANGNON, S. A.; WESTCOTT, N. E. (2002). *“Heavy Rainstorms in Chicago: Increasing Frequency, Altered Impacts, and Future Implications”*. Journal of the American Water Resources Association. 38 (5), pp.1467-1475.

Chicago Area Waterway System, <http://www.chicagoareawaterways.org/>. acesso em 10/06/2010

*Chicago Historical Information*, 1849-1855, 1866-1867: Early Cholera Epidemics. [http://web.archive.org/web/20070309133936/www.chipublib.org/004chicago/disasters/early\\_cholera.html](http://web.archive.org/web/20070309133936/www.chipublib.org/004chicago/disasters/early_cholera.html)[1] Acesso em 09/2010;

DOWNTOWN, M. W.; MILLER, J. Z. B.; e PIELKE Jr., R. A. (2005). *“Reanalysis of U.S. National Weather Service Flood Loss Database”*. Natural Hazards Review, ASCE, 6:1. pp.1-13.

FGTS, Fundo de Garantia do Tempo de Serviço.< <http://www.fgts.gov.br/downloads.asp>> Acesso em Outubro de 2009.

Fox News (2007). *“Heavy Rain Causes More Flooding in Chicago Suburbs*. Friday, August 24, 2007. <<http://www.foxnews.com/story/0,2933,294530,00.html>>. Acesso 08/2010

GALSTER, J. C.; PAZZAGLIA, F. J.; HARGREAVES, B. R.;MORRIS, D. P.;PETERS, S. C.; WEISMAN, R. N. (2006) *“Effects of urbanization on watershed hydrology: The scaling of discharge with drainage area”*. Geology. Geological Society of America; 34 (9), pp. 713-716.

HARREMÖES, P.(2002) Integrated urban drainage, status and perspectives. Water Science Techonology. 45(3):1-10.

HONGUY LI (2010), Mensagem recebida por email e discussão no mês de março de 2010. Informação pessoal.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *“Censos Demográficos de 1940, 1980, 1991 e 2000”*. Brasília- DF.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *“Cidades: Estimativa da população 2007”*. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso 08/2010

JASPER, F. G. W. (2003). *“Institutional arrangements for integrated river basin management”*. Water Policy. 5 pp. 77–90.

JOHNSTON, D. M.; BRADEN, J. B.; PRICE, T. H. (2006). Downstream Economic Benefits of Conservation Development. Journal of Water Resources Planning and Manegement, ASCE.132 (1) pp.35-43.

KONRAD, C. P. (2003) *“Effects of Urban Development on Floods”*. U.S. Geological Survey (USGS) Fact Sheet FS-076-03.

- KRON, W. (2009). *"Flood Insurance: from clients to global financial markets"*. Flood Risk Management 2 (1), pp. 68-75.
- NOAA Coastal Change Analysis Program, 2002. Land use change. (<http://www.csc.noaa.gov/crs/lca/ccap.html>). Acesso em 06/2010.
- LIU, J.; DIETS, T.; CARPENTER, S.; FOLKE, C.; ALBERTI, M.; REDMAN, C. L.; SCHNEIDER, S. H.; OSTROM, E.; PELL, A. N.; LUBCHENCO, J.; TAYLOR W. W.; OUYANG Z.; DEADMAN, P.; KRATZ T. and PROVENCHER, W. (2007). *"Coupled Human and Natural Systems"*. Royal Swedish Academy of Sciences, Ambio, 36 (8), pp. 639-649.
- MATLAB, 2010 - <http://www.matlab.com>. Acesso,em 05/2010
- MCT/CGE – Ministério de Ciência e Tecnologia / Centro de Estudos e Gestão Estratégica. *"Diretrizes Estratégicas para o Fundo de Recursos Hídricos de Desenvolvimento Científico e Tecnológico"*. ( 2002). Disponível em <<http://www.ana.gov.br>>
- MENDES, H. C. (2005). *Urbanização e impactos ambientais: histórico de inundações e alagamentos na bacia do Gregório, São Carlos-SP*. Dissertação de Mestrado. EESC – USP. São Carlos-SP.
- MENDES, H. C.; MENDIONDO, E. M. (2007) *"Histórico da Expansão Urbana e Incidência de Inundações: O Caso da Bacia do Gregório, São Carlos – SP"*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 12 (1), pp.17-27.
- MENDIONDO, E. M. (2005) *"Flood risk management of urban waters in humid tropics: early-warning, protection and rehabilitation"*, **Invited Paper** In: C. Tucci & J.Goldenfum (orgs.) Workshop on Integrated Urban Water Managmt. in Humid Tropics, UNESCO IHP-VI (Int. Hydrol. Program), 2-3 April 2005, Foz de Iguaçu.
- MENDIONDO, E. M. (2010). *Reducing vulnerability to water-related disasters in urban areas of the humid tropics; in Integrated Urban Water Management: Humid Tropics*. Org. Parkinson, J. N., Goldefum, J. A e Tucci, C.E.M., UNESCO. Vol. 6 Chapter 6.
- MOLDEN, D. and SAKTHIVADIVEL, R. (1999). *"Water Accounting to Assess Use and Productivity of Water"*, International Journal of Water Resources Development. 15 (1-2), pp. 55-71.
- MWRDGC** -METROPOLITAN WATER RECLAMATION DISTRICT OF GREATER CHICAGO, <<http://www.mwrdd.org/irj/portal/anonymous/Home>> Acesso em Julho de 2010.
- NIBH – Núcleo Integrado de Bacias Hidrográficas. (2004). *"Experimento Piloto de Gerenciamento Integrado de Bacias Urbanas para o Plano Direto de São Carlos, SP"*. FINEP – CT-Hidro/ EESC– USP/ DAAE-SP/ FIPAI.
- OTA, 1993 - <http://www.fas.org/ota/otareports/year/1993a/>. Acesso em 06/2010

- SIVAPALAN, M. , TAKEUCHI, K. , FRANKS, S.W. , GUPTA, V.K. , KARAMBIRI, H. , LAKSHMI, V. , LIANG, X. , McDONNELL, J. J. , MENDIONDO, E.M. , O'CONNELL, P.E. , OKI, T. , POMEROY, J.W. , SCHERTZER, D. , UHLENBROOK, S. and ZEHE, E.(2003) “*IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences*”, Hydrological Sciences Journal, 48 (6), pp. 857 - 880.
- SULLIVAN, C. (2002). “*Calculating a Water Poverty Index*”, World Development. Great Britain. 30 (7), pp. 1195–1210.
- TUCCI, C.E.M., 1998. Modelos Hidrológicos. Editora da UFRGS, ABRH, 652p, Porto Alegre - RS.
- TUCCI, C.E.M. (2008). “*Águas Urbanas*”. Estudos Avançados. 22 (63). <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142008000200007&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142008000200007&script=sci_arttext)> Acesso em 08/2010
- TUCCI, C.E.M.; BERTONI, J.C. (Org) (2003). *Inundações Urbanas na América do Sul*. 1ª ed.; Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre-RS.
- TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.; BARROS, M.T. (org). (1995). *Drenagem Urbana*. Ed. Universidade/UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre-RS.

## Anexo 1 – Resultados do Modelo para os Anos Hidrológicos de 2001 a 2006

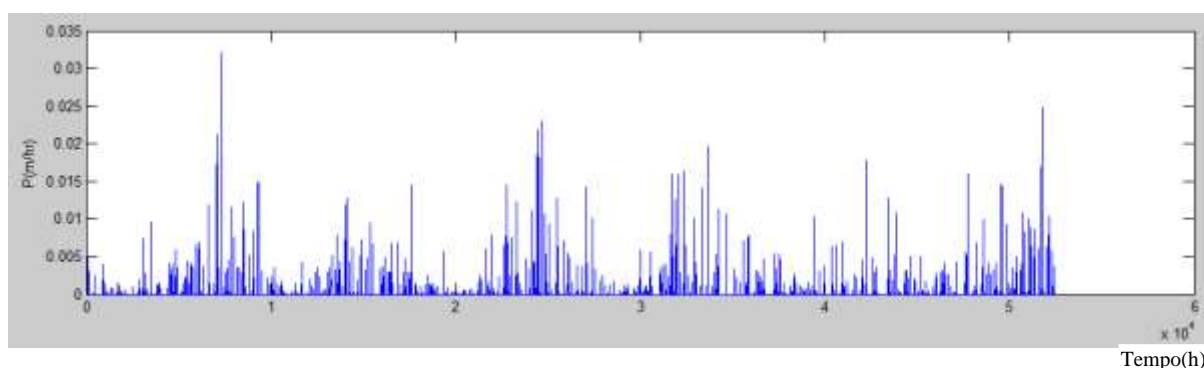


Gráfico A – Precipitação 2001 a 2006

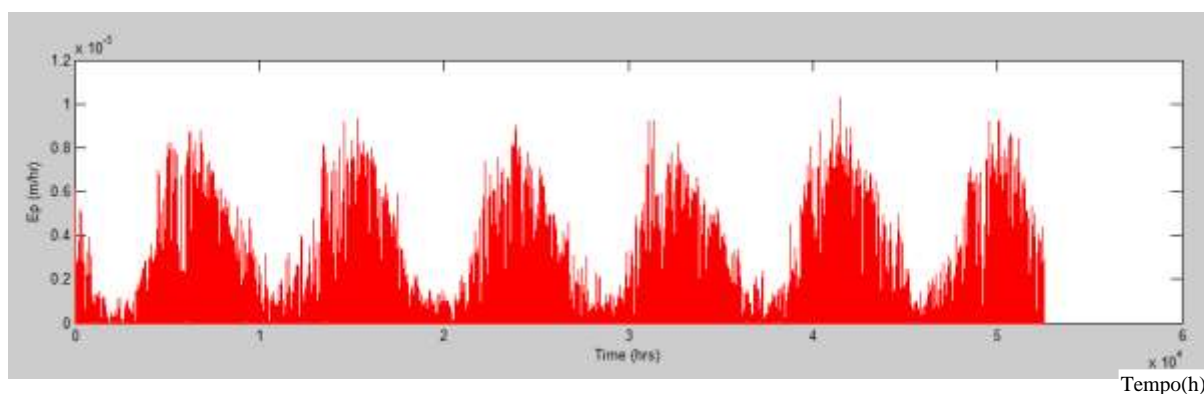


Gráfico B – Evapotranspiração 2001 a 2006

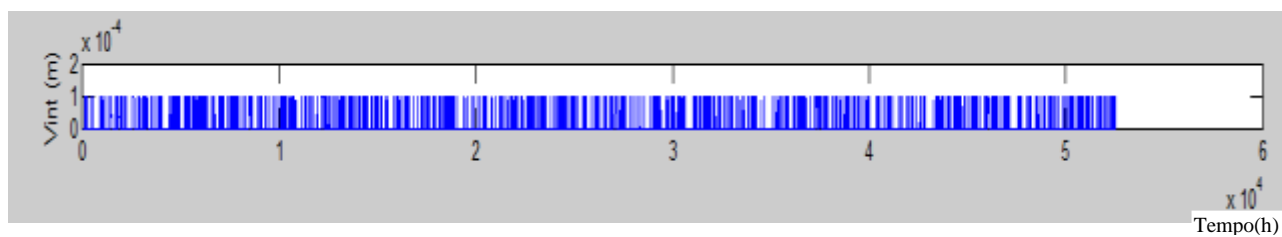


Gráfico C – Volume de interceptação pelo reservatório Canopy e depressões superficiais

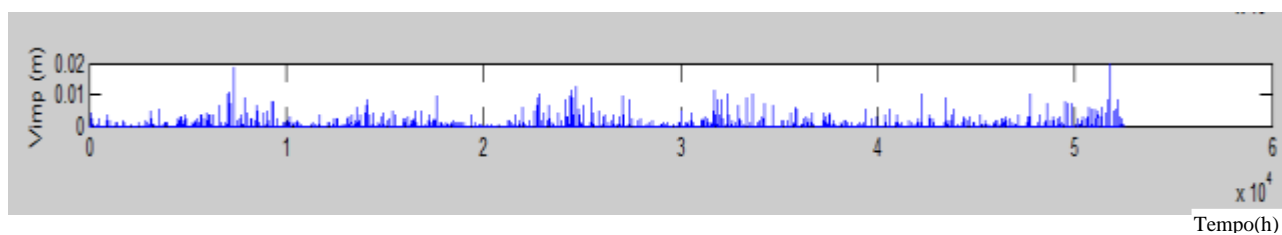


Gráfico D – Volume na área impermeável

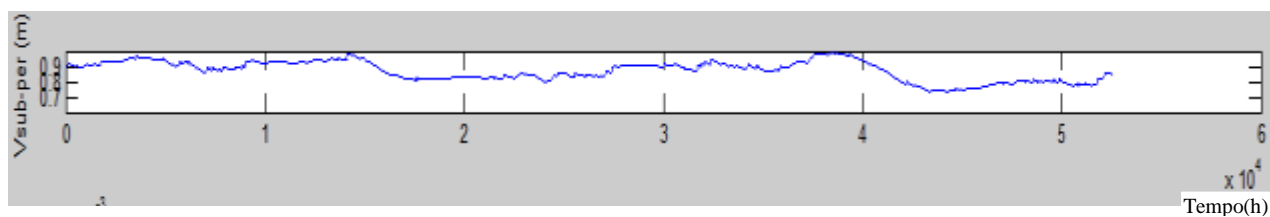


Gráfico E – Volume reservado em subsuperfície na área permeável

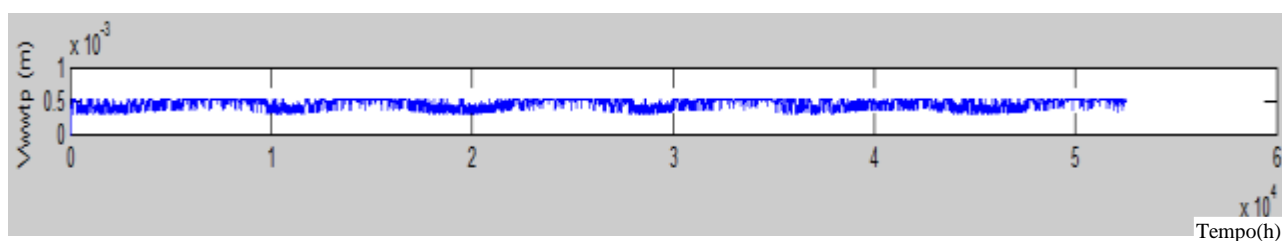


Gráfico F – Volume na estação de tratamento - WWTP

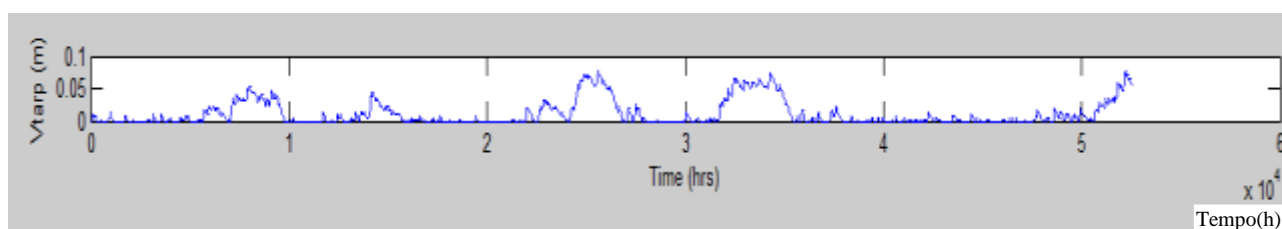


Gráfico G – Volume no TARP

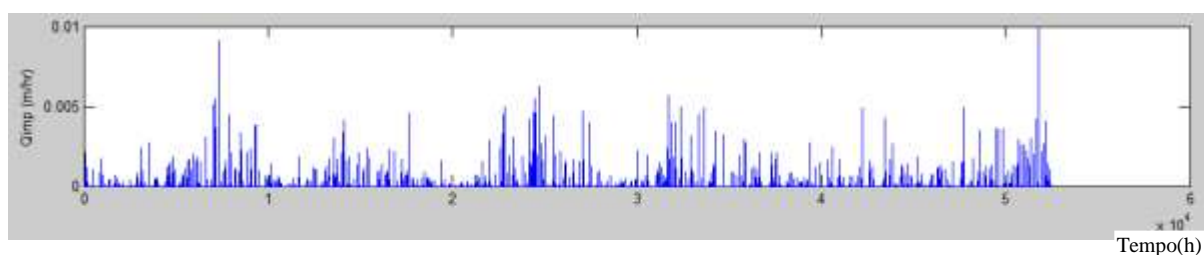


Gráfico H – Escoamento Superficial na área impermeável

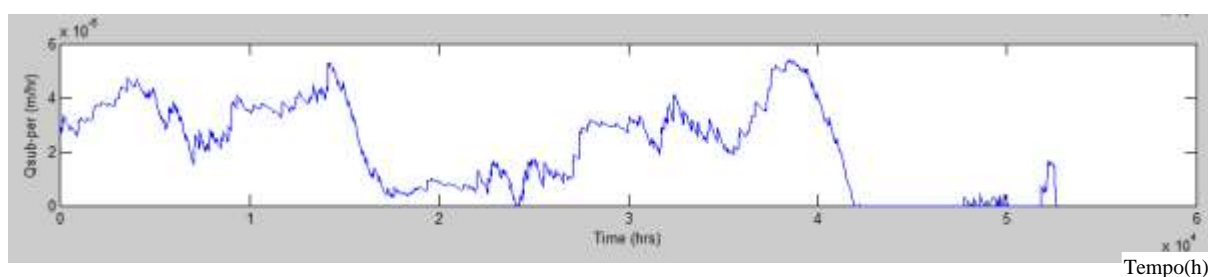


Gráfico I – Escoamento sub-superficial em área permeável

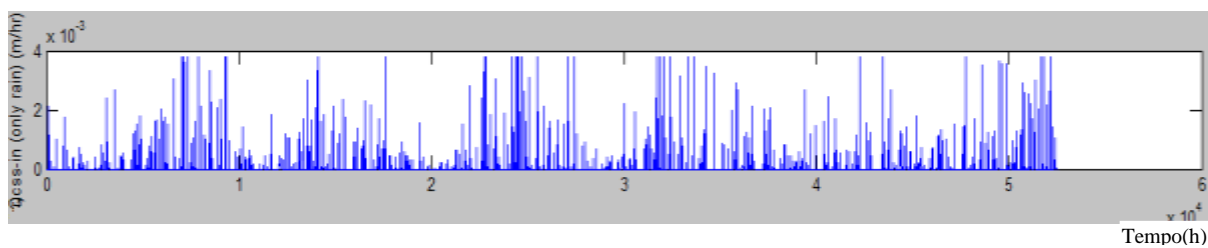


Gráfico J - Vazão de entrada no CSS, apenas chuva

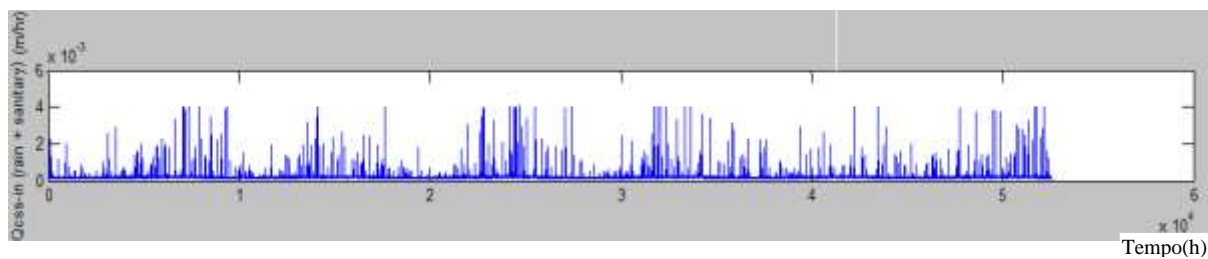


Gráfico K – Vazão de entrada no CSS, inclui chuva e vazão sanitária

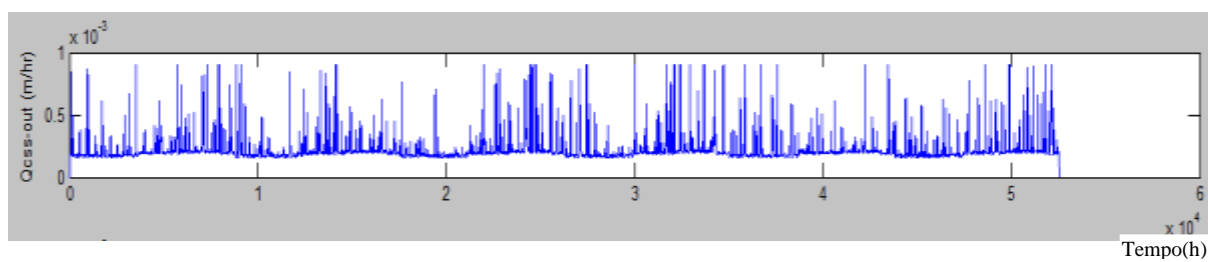


Gráfico L – Saída do Sistema Combinado

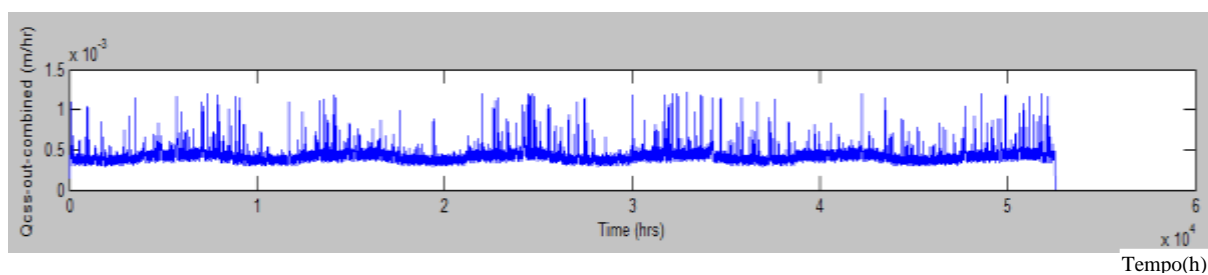


Gráfico M – Saída incluindo também a vazão sanitária do sistema único

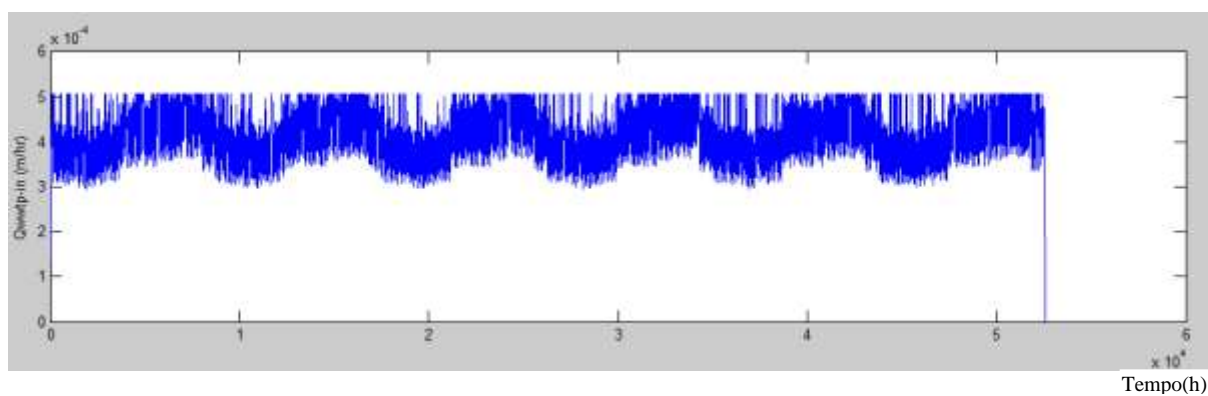


Gráfico N – Vazão de entrada na WWTP



