

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**ESTUDO DAS CARGAS DE SÓLIDOS SUSPENSOS
PROVENIENTES DA POLUIÇÃO DIFUSA NA LAGOA DE
DETENÇÃO DO GUARÁ II - DF**

DANIEL MOREIRA DIAS BATISTA

ORIENTADOR: SÉRGIO KOIDE, PhD

CO-ORIENTADORA: MARIA ELISA LEITE COSTA, MSc

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

BRASÍLIA / DF: JULHO / 2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**ESTUDO DAS CARGAS DE SÓLIDOS SUSPENSOS
PROVENIENTES DA POLUIÇÃO DIFUSA NA LAGOA DE
DETENÇÃO DO GUARÁ II - DF**

DANIEL MOREIRA DIAS BATISTA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

**SÉRGIO KOIDE, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**LEONARDO ZANDONADI MOURA, MSc (EnC/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**BRUNO ESTEVES TÁVORA, DSc (MPDFT)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 10 DE JULHO DE 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

BATISTA, DANIEL MOREIRA DIAS

Estudo das Cargas de Sólidos Suspensos Provenientes da Poluição Difusa na Lagoa de Detenção do Guará II – DF. [Distrito Federal] 2019.

xi, 62 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2019)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Drenagem Urbana

2. Qualidade da água

3. Lagoa de detenção

4. Modelo SWMM

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BATISTA, D. M. D. (2019). Estudo das Cargas de Sólidos Suspensos Provenientes da Poluição Difusa na Lagoa de Detenção do Guará II - DF. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 62 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Daniel Moreira Dias Batista

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Estudo das Cargas de Sólidos Suspensos Provenientes da Poluição Difusa na Lagoa de Detenção do Guará II - DF.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Daniel Moreira Dias Batista

mdbdaniel@gmail.com

71680-621 - Brasília/DF - Brasil

RESUMO

A urbanização quando realizada de maneira não planejada traz diversos problemas no âmbito urbano, rural e ambiental. Os sistemas de drenagem urbana das águas pluviais, se ausentes ou concebidos de forma inadequada, podem gerar diversos problemas quanto a aspectos ambientais e sanitários. Logo, necessita-se fazer o manejo das águas pluviais urbanas a fim de prevenir e minimizar os riscos associados à drenagem. A lagoa de retenção é uma forma de se minimizar e evitar os possíveis problemas relacionados às águas pluviais, onde se retém as águas por um período de tempo, diminuindo o pico de vazão afluente e cargas de sedimentos aos corpos receptores, evitando processos erosivos e inundações a jusante. O presente estudo busca analisar a lagoa de retenção do Guará II, Distrito Federal (DF), e sua influência na qualidade da água gerada pela sua área de contribuição (Cruzeiro Velho e Novo, Octogonal, SIA e Setor Policial Sul), especificamente as cargas de sedimentos. Para tal, foram instalados equipamentos nos locais de interesse como pluviógrafos, linígrafos, régua limimétrica e amostradores automáticos para levantar dados quantitativos e qualitativos por meio de análises laboratoriais das amostras coletadas na entrada e saída da lagoa de retenção. Com os dados obtidos do monitoramento qualitativo, pôde-se gerar polutogramas dos 3 eventos estudados e as curvas-chave das análises de SST para entrada e saída da lagoa. Com o auxílio dos polutogramas pôde-se observar que a lagoa de retenção apresentou uma remoção de SST de 85,51% no primeiro, 99,80% no segundo e 99,93% no terceiro evento. A lagoa de retenção estudada se mostrou um dispositivo eficiente na remoção de sedimentos. Foram realizadas também simulações com os dados por meio do modelo computacional hidrológico PCSWMM. Fez-se a simulação e calibração de vazões com a rede de drenagem da área de contribuição a fim de comparar os resultados com os dados observados. Também foi realizada a simulação de SST com o modelo, mas os resultados não se ajustaram bem aos dados observados, necessitando de ajustes na calibração para uma representação melhor das cargas geradas pelo sistema.

Palavras-chave: drenagem urbana, qualidade da água, cargas de sedimentos, PCSWMM.

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 3 |
| 2.1 | OBJETIVO GERAL..... | 3 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 3 |
| 3 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 3.1 | ÁGUAS URBANAS..... | 4 |
| 3.2 | DRENAGEM URBANA..... | 6 |
| 3.2.1 | Lagoa de retenção..... | 9 |
| 3.3 | QUALIDADE DA ÁGUA..... | 13 |
| 3.4 | MODELOS COMPUTACIONAIS PARA DRENAGEM URBANA..... | 18 |
| 3.4.1 | Modelo SWMM (<i>Storm Water Management Model</i>)..... | 19 |
| 4 | METODOLOGIA..... | 26 |
| 4.1 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO..... | 26 |
| 4.1.1 | Clima e solo..... | 30 |
| 4.2 | INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS..... | 31 |
| 4.2.1 | Régua linimétrica..... | 31 |
| 4.2.2 | Linígrafo de pressão..... | 32 |
| 4.2.3 | Linígrafo de boia..... | 33 |
| 4.2.4 | Pluviógrafo..... | 33 |
| 4.2.5 | Amostrador automático ISCO..... | 34 |
| 4.3 | MONITORAMENTO..... | 35 |
| 4.3.1 | Monitoramento quantitativo..... | 35 |
| 4.3.2 | Monitoramento qualitativo..... | 38 |
| 4.4 | MODELAGEM..... | 40 |
| 4.4.1 | Simulação quantitativa..... | 40 |
| 4.4.2 | Simulação qualitativa..... | 42 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 44 |
| 5.1 | MONITORAMENTO QUALI-QUANTITATIVO..... | 44 |
| 5.2 | MODELAGEM..... | 49 |

| | | |
|-------|----------------------------------|----|
| 5.2.1 | Simulação quantitativa | 49 |
| 5.2.2 | Simulação qualitativa | 54 |
| 6 | CONCLUSÕES | 57 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 58 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 – Balanço hídrico antes e depois do processo de urbanização (Schueler, 1987 <i>apud</i> Tucci, 2005)..... | 5 |
| Figura 3.2 – Escoamento antes e depois do processo de urbanização (Schueler, 1987 <i>apud</i> Tucci, 2005)..... | 6 |
| Figura 3.3 – Planta de uma lagoa de retenção típica (Adasa, 2018)..... | 10 |
| Figura 3.4 – Típica estrutura de saída de dois estágios (Gribbin, 2009)..... | 11 |
| Figura 3.5 – Fontes de poluição hídrica típicas de área urbana (Adasa, 2018)..... | 15 |
| Figura 4.1 – Mapa da Bacia do Lago Paranoá – Distrito Federal. | 26 |
| Figura 4.2 – Mapa da Unidade Hidrográfica Riacho Fundo – Distrito Federal. | 27 |
| Figura 4.3 – Mapa da rede de drenagem. | 28 |
| Figura 4.4 – Mapa da área da bacia de drenagem. | 28 |
| Figura 4.5 – a) Lagoa de Estabilização desativada, abril de 2004; b) Lagoa de retenção, junho de 2018. Fonte: Google Earth..... | 29 |
| Figura 4.6 – a) Saída da galeria de drenagem urbana após evento chuvoso em agosto de 2018; b) aglomerados de sedimentos secos depositados. | 30 |
| Figura 4.7 – Precipitação média mensal acumulada (mm) da série histórica de 1981-2010. Fonte: INMET, 2018. | 31 |
| Figura 4.8 – a) Régua limimétrica na entrada da lagoa; b) régua limimétrica na descarga de fundo da lagoa. | 32 |
| Figura 4.9 – a) Linígrafo de pressão a esquerda (tubo) no vertedor; b) tubo para linígrafo na entrada da lagoa. | 32 |
| Figura 4.10 – Linígrafo de boia instalado na saída da lagoa. | 33 |
| Figura 4.11 – Pluviógrafos instalados em telhados de prédios..... | 33 |
| Figura 4.12 – Locais de instalação dos pluviógrafos. | 34 |
| Figura 4.13 – Amostradores automáticos: a) galeria na entrada da lagoa; b) vertedor na saída da lagoa..... | 34 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.14 – Boias de ativação do amostrador automático no vertedor (esquerda) e galeria de drenagem na entrada da lagoa (direita)..... | 35 |
| Figura 4.15 – a) Saída da galeria de drenagem na lagoa de detenção; b) linígrafo de boia na galeria de drenagem..... | 35 |
| Figura 4.16 – a) vertedor da lagoa de detenção; b) entrada da descarga de fundo; c) águas pluviais escoando pela descarga de fundo do vertedor..... | 36 |
| Figura 4.17 – Transferência de dados de pluviógrafo (a) e linígrafo de boia (b)..... | 36 |
| Figura 4.18 – Medição da velocidade do fluxo na saída da lagoa com molinete..... | 37 |
| Figura 4.19 – a) Condutivímetro a esquerda e medidor de pH a direita; b) espectrofotômetro, medição de DQO; c) cápsulas (cadinhos) a esquerda e filtros (membranas) a direita para determinação de sólidos..... | 39 |
| Figura 4.20 – Sub-bacias na área de domínio dos pluviógrafos (Método de Thiessen)..... | 40 |
| Figura 5.1 – Curva-chave de SST na entrada da lagoa de detenção..... | 44 |
| Figura 5.2 – Curva-chave de SST na saída da lagoa de estabilização..... | 44 |
| Figura 5.3 – Polutograma de sólidos na entrada da lagoa para o evento do dia 08/12/2018. | 46 |
| Figura 5.4 – Polutograma de sólidos na saída da lagoa para o evento do dia 08/12/2018.. | 46 |
| Figura 5.5 – Polutograma de sólidos na entrada da lagoa para o evento do dia 25/02/2019. | 47 |
| Figura 5.6 – Polutograma de sólidos na saída da lagoa para o evento do dia 25/02/2019.. | 47 |
| Figura 5.7 – Polutograma de sólidos na entrada da lagoa para o evento do dia 16/03/2019. | 48 |
| Figura 5.8 – Polutograma de sólidos na saída da lagoa para o evento do dia 16/03/2019.. | 48 |
| Figura 5.9 – Fluxo de massa de SST e porcentagem de remoção pela lagoa de detenção.. | 49 |
| Figura 5.10 – Vazões e precipitações observadas nos diferentes eventos. a) Evento 1, 08/12/2018; b) evento 2, 25/02/2019; c) evento 3, 16/03/2019. | 50 |
| Figura 5.11 – Resultados das simulações quantitativas dos eventos sem calibração. a) Evento 1, 08/12/2018; b) evento 2, 25/02/2019; c) evento 3, 16/03/2019. | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.12 – Calibração e verificação do evento 1 no SRTC. | 52 |
| Figura 5.13 – Resultados das verificações dos eventos 2 (a) e 3 (b). | 53 |
| Figura 5.14 – Dados de SST simulados e observados do evento 1 (08/12/2018) na entrada da lagoa de detenção. | 54 |
| Figura 5.15 – Dados de SST simulados e observados do evento 2 (25/02/2019) na entrada da lagoa de detenção. | 55 |
| Figura 5.16 – Dados de SST simulados e observados do evento 1 (16/03/2018) na entrada da lagoa. | 55 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 – Causas e efeitos da urbanização sobre as inundações urbanas. | 6 |
| Tabela 3.2 – Categorias de medidas estruturais. | 7 |
| Tabela 3.3 – Vantagens e desvantagens das lagoas de retenção. | 9 |
| Tabela 3.4 – Principais parâmetros de investigação numa análise de qualidade da água. .. | 14 |
| Tabela 3.5 – Funções para cálculo de acúmulo de poluentes. | 22 |
| Tabela 3.6 – Funções para cálculo da lavagem de poluentes. | 23 |
| Tabela 4.1 – Parâmetros para análise e suas formas de determinação. | 38 |
| Tabela 4.2 – Distribuição das amostras nos eventos observados. | 39 |
| Tabela 4.3 – Parâmetros estatísticos de erros do PCSWMM. | 41 |
| Tabela 4.4 – Faixas de variação dos parâmetros para calibração do modelo no PCSWMM. | 42 |
| Tabela 5.1 – Valores máximos, mínimos, médias e desvios padrões das vazões e concentrações de SST observados nos eventos. | 45 |
| Tabela 5.2 – Parâmetros estatísticos de erros das simulações dos eventos sem calibração. | 50 |
| Tabela 5.3 – Faixas de variação dos parâmetros para calibração do modelo no PCSWMM. | 52 |
| Tabela 5.4 – Parâmetros estatísticos de erros das simulações dos eventos sem calibração e verificados. | 53 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

| | |
|------------------|--|
| Adasa | Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal |
| Caesb | Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal |
| CHI | <i>Computational Hydraulics International</i> |
| Conama | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CRH/DF | Conselho de Recursos Hídricos do Distrito Federal |
| DBO | Demanda Bioquímica de Oxigênio |
| DBO ₅ | Demanda Bioquímica de Oxigênio em 5 dias |
| DF | Distrito Federal |
| DQO | Demanda Química de Oxigênio |
| EPA | <i>Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental Americana) |
| FT | Fósforo Total |
| ISE | <i>Integral Square Error</i> |
| kg/s | quilograma por segundo |
| m | metros |
| MDE | Modelo Digital de Elevação |
| mg/l | miligrama por litro |
| mm | milímetros |
| Novacap | Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil |
| NSE | <i>Nash-Sutcliffe</i> |
| OD | oxigênio dissolvido |
| PDDU | Plano Diretor de Drenagem Urbana |
| pH | potencial de Hidrogênio |
| R ² | coeficiente de determinação |
| SDT | sólidos dissolvidos totais |
| SEE | <i>Standard Error of Estimate</i> |
| SIA | Setor de Indústria e Abastecimento |
| SIG | Sistema de Informações Geográficas |
| SS | Sólidos Suspensos |
| SST | Sólidos Suspensos Totais |
| ST | Sólidos Totais |
| SWMM | <i>Storm Water Management Model</i> (Modelo de Gestão de Águas Pluviais) |
| ton/dia | tonelada por dia |

1 INTRODUÇÃO

A crescente urbanização no mundo é um fato que traz muitos benefícios aos seres humanos em alguns aspectos, mas o processo de urbanização não deve ser desordenado, pois o crescimento das cidades pode causar vários efeitos negativos não só no ambiente urbano como nos ambientes naturais próximos aos centros urbanos. A falta de planejamento, gestão e gerenciamento adequado dos vários sistemas urbanos pode causar diversas consequências à saúde humana, à qualidade de vida da população e ao meio ambiente.

Os serviços de saneamento ambiental são fatores muito importantes em áreas urbanas, em que se aborda o tratamento e abastecimento de água, tratamento de águas residuárias, manejo de resíduos sólidos e de águas pluviais. Esses sistemas devem ser concebidos e operados de forma integrada com intuito de auxiliar na preservação da qualidade ambiental nas áreas de influência.

Os sistemas de drenagem urbana das águas pluviais se ausentes ou concebidos de forma inadequada podem gerar diversos problemas quanto a aspectos ambientais e sanitários, como poluição de corpos receptores, alagamentos e proliferação de doenças. Outro aspecto muito relevante é a questão de uso e ocupação do solo em áreas que estão sujeitas à inundação, em que, normalmente, pessoas de menor renda se acomodam de forma desorganizada e insustentável.

O manejo das águas pluviais urbanas é importante por prevenir e minimizar os riscos associados à drenagem quanto à qualidade ambiental e sanitária das áreas urbanas e naturais de influência. A qualidade das águas rurais e urbanas pode ser afetada por poluições de origem pontual ou difusa, sendo as de origem difusa mais observadas nas redes de drenagem urbana. Isso se dá pelo fato de que nas áreas urbanas há diversos tipos de uso e ocupação do solo, emissões de gases poluentes de indústrias e automóveis, maior quantidade de resíduos sólidos e quando ocorre precipitação todos os poluentes na atmosfera e superfície são carregados com as águas da chuva para as redes e corpos hídricos receptores.

Há algumas formas de se minimizar e evitar os possíveis problemas relacionados às águas pluviais, como medidas não estruturais (planos, leis, normas e medidas naturais) e medidas estruturais (obras de engenharia), como as lagoas de detenção e retenção. As lagoas de detenção são reservatórios de quantidade com o objetivo reter as águas pluviais por um período de tempo, diminuindo o pico de vazão afluente aos corpos receptores, evitando processos erosivos e inundações a jusante.

Devido à complexidade de se projetar, dimensionar e operar sistemas de drenagem urbana, os modelos matemáticos são utilizados a fim de se permitir um melhor estudo dos comportamentos hidráulicos e hidrológicos relevantes ao tema. Dessa forma, os modelos passaram a ser ferramentas que auxiliam na concepção de planejamentos, gestão e gerenciamento das redes de drenagem. Há diversos modelos para drenagem urbana e dentre os mais utilizados tem-se o *Storm Water Management Model* (SWMM). Existem também diversos programas gratuitos e comerciais que incorporam diferentes modelos e propiciam maior facilidade de tratamento de dados, como é o caso do PCSWMM comercializado pela *Computational Hydraulics International* (CHI).

O trabalho busca analisar a lagoa de retenção do Guará II, Distrito Federal (DF), e sua influência na qualidade da água gerada pela sua área de contribuição, especificamente sobre as cargas de sedimentos. A lagoa encontra-se em operação há mais de 10 anos, mas não há estudos sobre seu funcionamento atual, principalmente sobre a qualidade das águas aduzidas à lagoa de retenção.

O presente trabalho está estruturado com seis capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução. O capítulo 2 expõe os objetivos gerais e específicos do estudo. O capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica e a revisão bibliográfica, onde são expostos os aspectos mais relevantes da pesquisa (águas urbanas, qualidade da água, drenagem urbana, lagoa de retenção, modelagem e o modelo SWMM). O capítulo 4 trata sobre a caracterização da área de estudo, trazendo aspectos de localização, clima e pedologia, além de apresentar a metodologia utilizada a fim de alcançar os objetivos do estudo. O capítulo 5 dispõe dos resultados e discussão provenientes das metodologias aplicadas. Por fim, no capítulo 6 apresenta-se as conclusões sobre o estudo realizado.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar, por meio de monitoramento e modelagem computacional, a eficiência da lagoa de retenção do Guará II - DF na remoção de sólidos suspensos em eventos de cheia.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar a qualidade das águas pluviais quanto aos sólidos suspensos na entrada e saída da lagoa de retenção por meio de amostragens e monitoramento, analisando a influência da lagoa na remoção das cargas de sedimentos;
- Simular e calibrar quantitativamente a área de contribuição da lagoa para os eventos desejados com o programa PCSWMM;
- Simular a geração de cargas de sólidos suspensos da poluição difusa na bacia de drenagem contribuinte com o programa PCSWMM para os eventos desejados;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas informações, conceitos e pesquisas relevantes para o entendimento e desenvolvimento do presente estudo. Discute-se o fenômeno da urbanização, as águas urbanas e seus efeitos. Apresenta-se os aspectos da drenagem urbana e as formas pelas quais pode-se manejar as águas pluviais, analisando mais especificamente lagoas de retenção que corresponde ao objeto de estudo do trabalho. Discorre-se sobre a importância da qualidade da água e sobre a qualidade das águas pluviais. Por fim, discute-se sobre a modelagem computacional na drenagem urbana e mais especificamente sobre o modelo SWMM.

3.1 ÁGUAS URBANAS

O processo de urbanização pode incorrer remoção da cobertura vegetal reduzindo os níveis de infiltração e retenção da água da chuva, impactos sobre a fauna, alteração do relevo natural com nivelamento de áreas de acordo com os futuros usos, aterramento de pequenos córregos, mudança dos cursos de rios, além de ocupações irregulares de várzeas que sofrem alagamentos naturais e inundações devido à ausência ou falha de sistemas sanitários (Canholi, 2005). Esses fatos se dão devido ao crescimento das cidades, implicando diretamente nas infraestruturas sanitárias (abastecimento de água, tratamento de águas residuárias, manejo de águas pluviais e resíduos sólidos) que acabam sendo, quando não ausentes, mal planejadas e operadas.

Tucci (2005) cita os principais problemas relacionados entre as infraestruturas e a urbanização nos países em desenvolvimento, principalmente os latino americanos, como sendo:

- elevadas densidades demográficas, com deficiências nas infraestruturas sanitárias e no sistema de transporte, ocorrendo vários tipos de poluição. Essa situação impacta na saúde e na qualidade de vida da população, além de apresentar diversos riscos de impactos ambientais.
- aumento das populações periféricas às cidades devido ao processo de migração rural para os centros urbanos em busca de empregos. Esses locais, normalmente, apresentam ausência ou baixa qualidade de infraestruturas e equipamentos urbanos (água tratada, esgoto sanitário, drenagem urbana, coleta de resíduos, transporte, segurança, etc.)

- priorização nos planejamentos de urbanização para áreas destinadas à população de renda média e alta. O não planejamento pode trazer várias consequências, como escorregamentos e inundações em áreas de risco que acabam vitimando muitos cidadãos.

Normalmente, o planejamento urbano é concebido a fim de contemplar a cidade formal, enquanto que as cidades informais apenas são avaliadas quanto às tendências de ocupação. Com isso, pode-se listar alguns problemas de infraestrutura devido à esse olhar centralizado de planejamento, como: falta de tratamento de águas residuárias, assim ocorrendo lançamentos irregulares na rede de drenagem e chegando em corpos receptores; falta de drenagem urbana, ocorrendo inundações frequentes; ocupação ribeirinha de leitos de rios, ocorrendo inundações frequentes; impermeabilização e canalização de rios urbanos, aumentando vazões de cheia e suas frequências; aumento da carga de resíduos sólidos, alterando a qualidade das águas pluviais afluentes aos rios próximos às áreas urbanas e; degradação da qualidade das águas por falta de tratamento dos efluentes, proporcionando potenciais riscos ao ambiente e à saúde humana (Tucci, 2005).

O ciclo hidrológico e o hidrograma de uma bacia são afetados pelo processo de urbanização devido à maior impermeabilização do solo. Nas Figuras 3.1 e 3.2 pode-se observar as mudanças ocorridas após a urbanização de uma área, como: aumento do escoamento superficial; aumento da velocidade do escoamento, diminuição do tempo de concentração; aumento das vazões máximas, antecipando vazões de pico temporalmente; aumento dos riscos de inundações; redução da infiltração no solo; diminuição do nível do lençol freático e redução do escoamento subterrâneo e; redução da evapotranspiração.

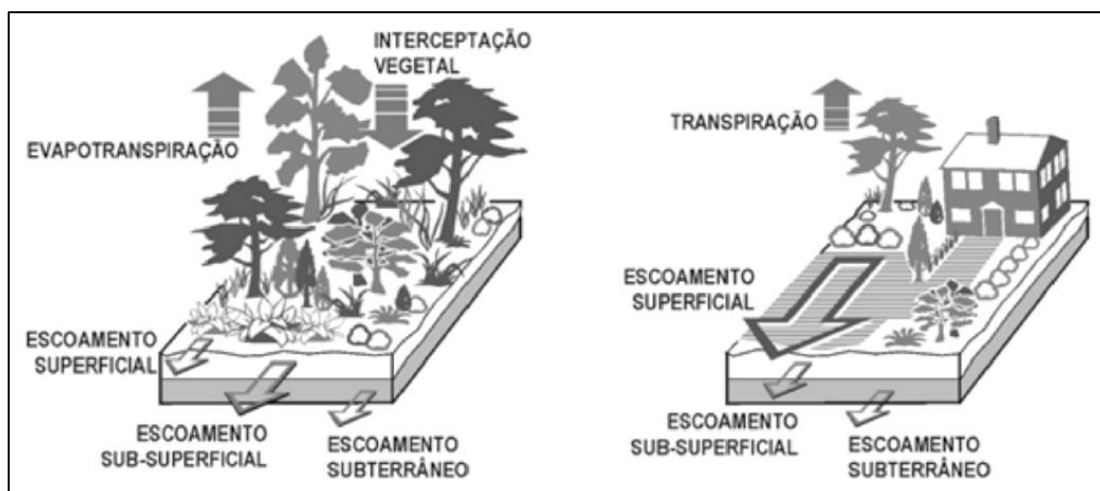


Figura 3.1 – Balanço hídrico antes e depois do processo de urbanização (Schueler, 1987 *apud* Tucci, 2005)

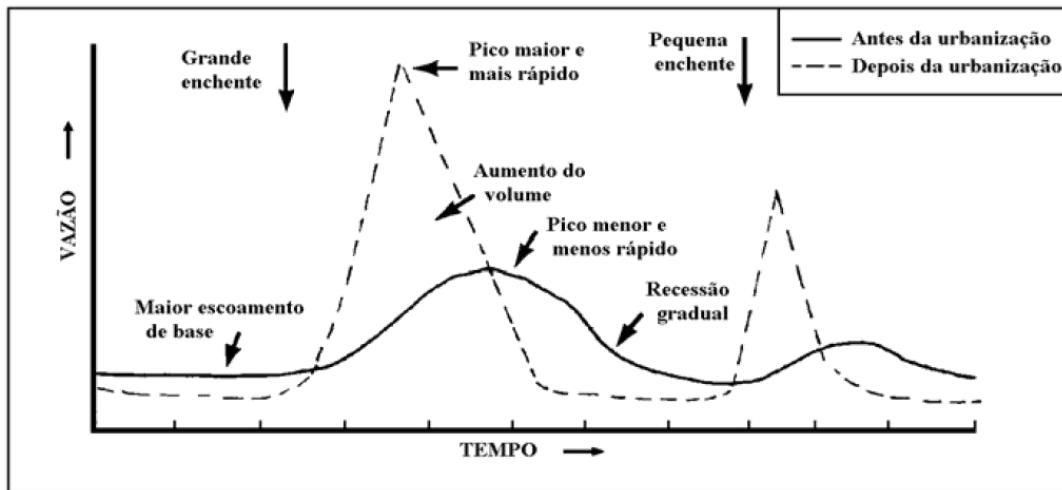


Figura 3.2 – Escoamento antes e depois do processo de urbanização (Schueler, 1987 *apud* Tucci, 2005)

Tucci (2001) cita as causas e efeitos mais observados em relação às inundações urbanas, como mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Causas e efeitos da urbanização sobre as inundações urbanas.

| CAUSAS | EFEITOS |
|--|---|
| Impermeabilização | Maiores picos e vazões. |
| Redes de drenagem | Maiores picos a jusante. |
| Lixo | Degradação da qualidade da água; Entupimento de bocas de lobo e galerias. |
| Redes de esgotos deficientes | Degradação da qualidade da água; Moléstias de veiculação hídrica; Sérias consequências em inundações. |
| Desmatamento e Desenvolvimento desordenado | Maiores picos e volumes; Mais erosão; Assoreamento em canais e galerias. |
| Ocupação de várzeas | Maiores picos; Maiores prejuízos; Maiores custos de utilidades públicas. |

Fonte: Adaptado de Tucci, 2001.

3.2 DRENAGEM URBANA

Sistemas de drenagem são necessários em áreas urbanas desenvolvidas devido à interação entre a atividade humana e o ciclo natural da água. Essa interação tem como forma principal a cobertura de terra com superfícies impermeáveis que desviam a água da chuva

do sistema natural para locais de drenagem. A drenagem urbana tem duas interfaces principais, com o público e com o meio ambiente (Butler & Davies, 2011).

Por um longo período a drenagem urbana tinha como objetivo principal a remoção das águas pluviais excedentes da forma mais rápida e eficiente a fim de prevenir transtornos, prejuízos materiais e inundações. Deste modo, as medidas tomadas visavam a realização de projetos e obras estruturais com intuito de simplesmente levar as águas pluviais a jusante o mais rápido possível (Tucci, 2001).

A fim de tentar dar solução e minimizar os diversos problemas ligados às águas pluviais no meio urbano (inundações) e no meio ambiente (impactos em corpos hídricos receptores), há conjuntos de medidas estruturais e não estruturais que podem ser utilizados.

As medidas estruturais de manejo da água pluvial têm por objetivo a detenção ou transporte dos deflúvios provenientes da bacia de drenagem e a infiltração em escala local, podendo promover o tratamento da água. Essas obras visam a redução dos impactos da urbanização no hidrograma resultante. Um exemplo são as lagoas de detenção que amortecem a vazão máxima, com redução de impactos a jusante por regularem os picos das vazões (Righetto, 2009). As medidas estruturais podem ser classificadas de acordo com categorias funcionais, tais como na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Categorias de medidas estruturais.

| CATEGORIA | TIPO |
|------------------------------|---|
| Detenção do escoamento | Bacia de detenção ou de atenuação de cheia Bacia de retenção com infiltração |
| Área inundável | Terreno adaptado a alagamento |
| Vegetação | |
| Dispositivos de infiltração | Vala de infiltração Bacia de infiltração Pavimento poroso |
| Filtros orgânicos e de areia | Filtro superficial de areia Filtro subterrâneo |
| Tecnologias alternativas | |

Fonte: Righetto, 2009.

As medidas estruturais se mostram necessárias e essenciais para solucionar vários problemas devido às inundações urbanas, mas de acordo com o panorama nacional e internacional observa-se um crescimento pela busca de técnicas alternativas de menor custo,

mais eficazes e sustentáveis para o manejo de águas pluviais urbanas, ditas como medidas não estruturais (Tucci, 2001).

As medidas não estruturais são aquelas que empregam formas naturais a fim de reduzir a ocorrência de escoamento e carga poluidora. São medidas que saem do âmbito das obras e partem para ações sociais a fim de alterar padrões comportamentais da população, por meios legais, medidas econômicas e programas educacionais. São chamadas também como medidas de controle na fonte e medidas compensatórias por atuarem em âmbito local ou mais próximo da origem dos escoamentos, determinando critérios para controle do uso e ocupação do solo das áreas (Baptista *et al.*, 2011).

As medidas não estruturais incorporam um conjunto de regras de controle de uso e ocupação do solo. Dessa forma, tem-se o Plano de Diretor de Drenagem Urbana (PDDU) com definição de regras que buscam o controle e prevenção, incorporando medidas estruturais e não estruturais em perspectivas atuais e futuras de ocupação (Righetto, 2009). Há quatro tipos de ações englobadas pelas medidas compensatórias de controle do escoamento na fonte, sendo:

- planejamento, projeto e implantação de estruturas de retenção e armazenamento;
- manutenção adequada das superfícies permeáveis e impermeáveis;
- educação e treinamento para conscientizar a população dos problemas ambientais, e sua relação com a água;
- regulamentação, vigilância e mecanismos de sanções.

Em 2009, foi consolidado o PDDU do DF para disponibilizar um instrumento de planejamento que trate da drenagem e manejo das águas pluviais em área urbana.

De acordo com Tucci (2001), para que as medidas de drenagem urbana sejam eficazes alguns fatores são necessários, como: políticas no setor que definam objetivos e metas, além dos meios (legais, institucionais, técnicos e financeiros) para alcançá-los; políticas de uso e ocupação do solo de forma harmônica com as políticas de drenagem urbana, principalmente em relação às ocupações em áreas inundáveis; planejamentos com medidas de curto, médio e longo prazo para toda a bacia; instituições e entidades eficientes, além de tecnologicamente capazes de fazer uma gestão, planejamento, gerenciamento e operação das obras e medidas de manejo de águas pluviais de uma forma competente e integrada, com participação social.

A Resolução nº 9/2011 da Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (Adasa), determina que as águas precipitadas nos terrenos devem ser contidas e retardadas antes de serem conduzidas para redes de drenagem. Ela dispõe sobre o emprego de reservatórios de qualidade (lagoa de retenção) e quantidade (lagoa de detenção), com o objetivo de promover a preservar a qualidade e quantidade da água do corpo hídrico receptor. Os reservatórios de qualidade retêm o volume de água originado pelo escoamento superficial com o objetivo de reduzir a carga poluente e os reservatórios de quantidade retêm a água diminuindo as vazões de pico. O objeto deste estudo é uma lagoa de detenção, sendo melhor descrita a seguir.

3.2.1 Lagoa de detenção

As lagoas de detenção, normalmente, são concebidas para trabalhar em série com a rede de drenagem urbana, ocorrendo esvaziamento completo entre eventos. Por ter um tempo de detenção relativamente pequeno, se mostram pouco eficientes na remoção de matéria sólida ou substâncias poluentes e são mais utilizadas para o amortecimento da vazão máxima lançada ao corpo hídrico receptor, reduzindo efeitos de inundações e o potencial de erosão na bacia (Righetto, 2009).

Segundo o Departamento de Proteção Ambiental de Massachussetts - *Massachusetts Department of Environmental Protection* - (1997), há vantagens e desvantagens que devem ser consideradas na implantação de lagoas de detenção, como mostrado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Vantagens e desvantagens das lagoas de detenção.

| VANTAGENS | DESvantagens |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Possui baixo custo de implantação; • Atua no controle quantitativo e qualitativo; • Pode ser opção de implantação em bacias de drenagem já existentes; • Pode remover níveis significativos de sedimentos e poluentes. | <ul style="list-style-type: none"> • Requer uma área relativamente grande para implantação; • Requer nível de manutenção moderado à alto; • Pode ocorrer resuspensão de sedimentos após grandes tempestades se não houver manutenção adequada; • Baixa remoção de poluentes dissolvidos. |

Fonte: *Massachusetts Department of Environmental Protection*, 1997.

As lagoas de detenção podem ser utilizadas em áreas residenciais, comerciais e industriais. Devido sua capacidade limitada de remoção de poluentes dissolvidos, as lagoas são mais aplicáveis para locais comerciais onde há maiores cargas de sedimentos, metais e hidrocarbonetos. Em áreas residenciais de baixa densidade, onde os nutrientes dissolvidos

de pesticidas e fertilizantes podem ser uma preocupação. o uso de lagoas de detenção sozinho deve ser considerado com muito cuidado (Massachusetts Department of Environmental Protection, 1997).

Os mecanismos de tratamento primário observados nas lagoas de detenção são normalmente fornecidos por dois processos unitários principais - sedimentação e infiltração. Tendo a sedimentação como processo mais significativo em relação a infiltração. Os sólidos suspensos (SS) maiores podem ser removidos de forma eficaz por processos de sedimentação gravitacional. As lagoas de detenção a seco reduzem consideravelmente os volumes de efluentes por meio de infiltração e de forma menos significativa por evapotranspiração, o que se traduz em menores cargas totais de sólidos suspensos totais (SST) a jusante (DoT, 2008 *apud* Pezzaniti *et al.*,2012).

Para que a lagoa de detenção funcione de forma eficiente deve-se observar alguns aspectos construtivos. Segundo a Adasa (2018), deve-se interligar o sistema de drenagem a jusante da lagoa de detenção através da implantação de uma descarga de fundo e um vertedor para um corpo hídrico receptor ou canal a céu aberto, sendo providencial a instalação de um dissipador de energia. Na Figura 3.3 pode-se observar uma configuração típica de lagoa de detenção.

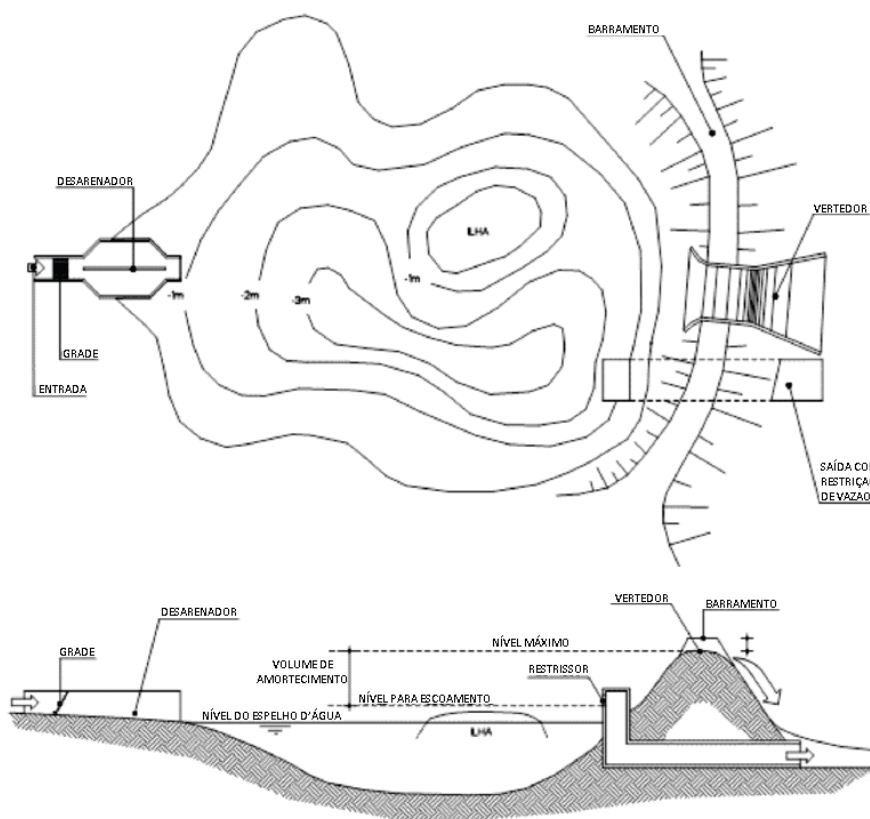


Figura 3.3 – Planta de uma lagoa de detenção típica (Adasa, 2018).

A água reservada em uma lagoa de retenção é liberada lentamente por estruturas de saída, que usualmente são um único bueiro/tubo curto/orifício ou uma combinação de bueiro e vertedor (Figura 3.4). A estrutura de saída mais simples é um único tubo com a soleira posicionada na cota mais baixa da lagoa, chamada saída de único estágio, escoando água somente pelo bueiro (Gribbin, 2009). Pode-se utilizar outra saída mais elevada para eventos extremos em que somente o bueiro não suporta todo o escoamento decorrente da precipitação.

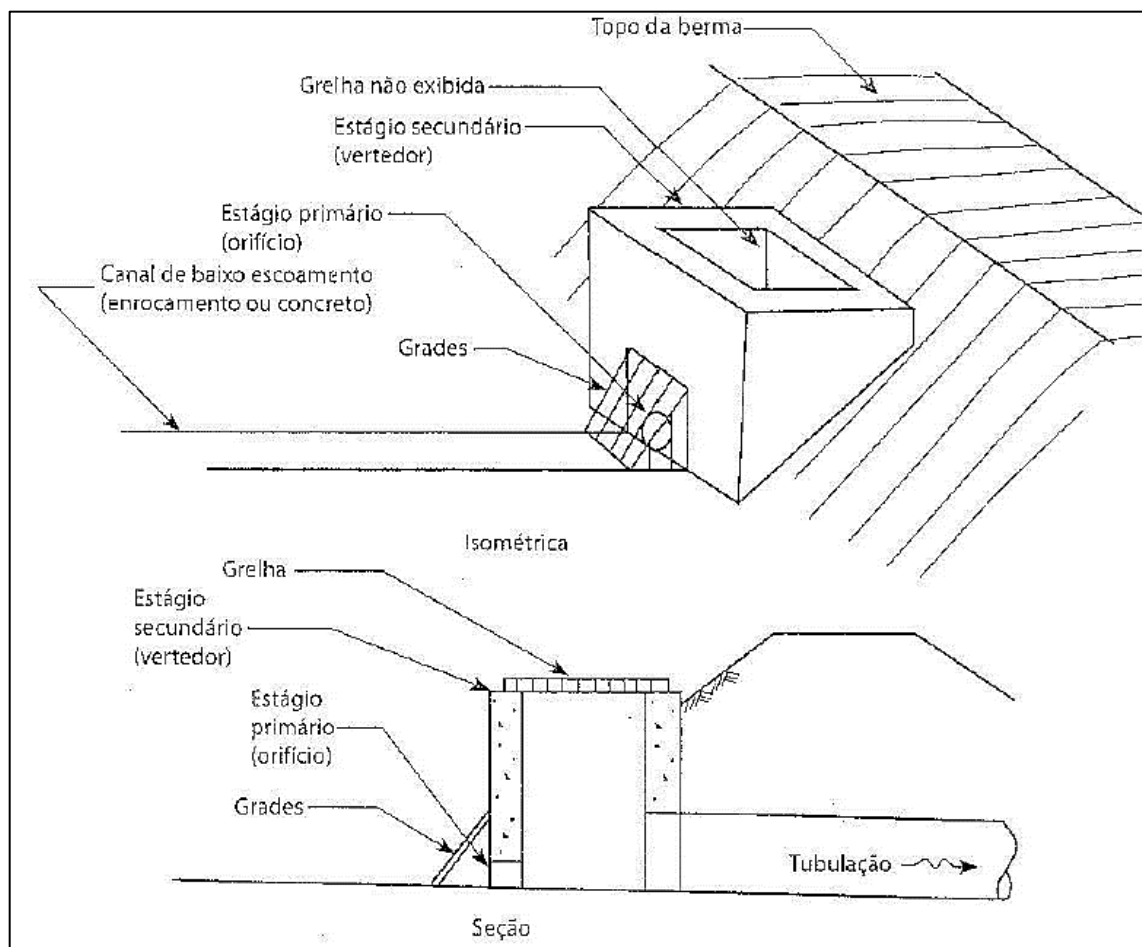


Figura 3.4 – Típica estrutura de saída de dois estágios (Gribbin, 2009).

A Novacap exige a instalação de dissipadores e a Resolução Adasa nº 9/2011 determina que a “velocidade do escoamento a jusante da obra de drenagem executada no Distrito Federal não poderá aumentar em relação à condição existente”. Essas exigências de projeto buscam minimizar os efeitos de processos erosivos em pontos de lançamento (Adasa, 2018).

Alguns estudos realizados no Brasil e no exterior avaliam os impactos do funcionamento das lagoas de retenção em operação, assim como a implantação dessa medida em determinados ambientes, sobre os aspectos quantitativos e qualitativos das águas pluviais.

Silva & Lima (2016) fizeram uma análise dos impactos causados pela urbanização do Setor Noroeste, em Brasília – DF, na drenagem urbana por meio de modelagem matemática, utilizando o programa PCSWMM. Estudou-se o comportamento de quatro lagoas de retenção. As lagoas apresentaram bons resultados no amortecimento dos picos de cheia. Os resultados apontaram alterações no escoamento superficial produzido, como as medidas alternativas simuladas (reservatórios prediais com controle de saída e pavimentos permeáveis nos estacionamentos dos edifícios) que implicaram numa redução de 27% nos picos de vazão.

Gomes (2015) avaliou as características de qualidade das águas pluviais nas bacias de retenção do DF através dos parâmetros de condutividade, cor aparente, DBO₅, DQO, FT, nitrato, nitrogênio amoniacal, óleos e graxas, SDT, SST, sólidos totais (ST), turbidez, coliformes termotolerantes e pH. Constatou-se que 7 dos oito conjuntos de retenção analisados possuíam alguns dos parâmetros em discordância com o que é definido pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Todos conjuntos avaliados não obtiveram diferença significativa entre o observado a montante (saída da rede de drenagem urbana) e a jusante (lançamento em corpo hídrico receptor) das bacias de retenção. Isso acaba evidenciando pouca influência das bacias avaliadas e baixa interferência na qualidade das águas drenadas.

Pezzaniti *et al.* (2012) investigaram uma bacia de retenção localizada em Adelaide, Austrália. Foram estudadas as concentrações médias de poluentes em seis eventos de chuva e determinadas as cargas totais de poluentes para águas pluviais afluentes e efluentes à bacia. Os parâmetros de qualidade da água testados foram pH, condutividade, SST, sólidos dissolvidos totais (SDT), nitrogênio total, FT, hidrocarbonetos totais, cádmio, cromo, cobre, chumbo, zinco e níquel. A comparação da qualidade das águas afluentes e efluentes demonstrou que as reduções médias foram de 63% para SST e 32% para SDT.

Birch *et al.* (2006) avaliaram a eficiência de um dispositivo de retenção/detenção adjacente a uma grande rodovia em Sydney, Austrália. Foram avaliados SST, um conjunto de metais (cádmio, cromo, cobre, ferro, manganês, níquel, chumbo e zinco), nutrientes (fósforo total - FT, nitrogênio total Kjeldahl, óxido de nitrogênio e nitrogênio total) e

coliformes fecais. A eficiência média de remoção de cobre, chumbo, manganês e zinco foi de 23, 41, 43 e 41%, respectivamente, enquanto a redução média nas concentrações de cromo, ferro e níquel foi de apenas 0, 3 e 1%, respectivamente. Os SST apresentaram grande variabilidade nas eficiências de remoção, de 12 a 93% e média de 40%. A eficiência média de remoção do nitrogênio de Kjeldahl e do nitrogênio total foi alta, 56 e 28%, respectivamente. O óxido de nitrogênio e o FT tiveram remoção de 42 e 75%, respectivamente. Os coliformes fecais apresentaram baixa concentração e uma eficiência de remoção de 16 a 68%.

3.3 QUALIDADE DA ÁGUA

De acordo com Von Sperling (2005), a qualidade da água pode ser representada por vários parâmetros que exprimem suas principais características, sendo elas: físicas – cor, turbidez, sabor, odor e temperatura; químicas – pH, alcalinidade, acidez, dureza, ferro e manganês, cloretos, nitrogênio, fósforo, Oxigênio Dissolvido (OD), matéria orgânica (DBO e DQO), micropoluentes orgânicos e inorgânicos; e biológicas, microrganismos de interesse sanitário e ambiental – bactérias, algas, fungos, protozoários, vírus e patógenos em geral. Esses parâmetros podem ser determinados em laboratórios de análise de água de forma rotineira. Os parâmetros de qualidade da água auxiliam na caracterização de águas de abastecimento, águas residuárias, águas pluviais, mananciais e corpos receptores.

A Resolução CONAMA N° 357, 2005, dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Dessa forma, para que águas pluviais provenientes da drenagem urbana sejam lançadas em corpos receptores, deve-se observar alguns parâmetros de lançamento.

Para realizar uma análise de água, deve-se eleger os parâmetros que serão investigados na ocasião. Von Sperling (2005) apresenta uma relação da associação mais frequente entre os parâmetros e o tópico a ser estudado, como mostra o Tabela 3.4. Deve-se atentar ao fato que são parâmetros usuais e que o entendimento das particularidades de cada situação é substancial para a definição adequada dos parâmetros a serem incluídos na análise.

Tabela 3.4 – Principais parâmetros de investigação numa análise de qualidade da água.

| Características | Parâmetro | Águas para abastecimento | | Águas Residuárias | | Corpos Receptores | | Águas Pluviais | |
|--------------------------|--|--------------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|------|----------------|---|
| | | Águas superficiais | | Bruta | Tratada | Rio | Lago | | |
| | | Bruta | Tratada | | | | | | |
| Físicas | Cor | x | x | | | x | x | | |
| | Turbidez | x | x | | | x | x | x | |
| | Sólidos (totais, dissolvidos, suspensos) | | | | | | | x | |
| | Sabor e odor | x | x | | | | | | |
| | Temperatura | x | | x | | x | x | x | |
| Químicas | pH | x | x | x | | x | x | x | |
| | Alcalinidade | x | | x | | | | | |
| | Acidez | x | | | | | | | |
| | Dureza | | | | | | | | |
| | Ferro e Manganês | x | x | | | | | | |
| | Cloretos | x | | | | | | x | |
| | Nitrogênio | x | x | x | x | x | x | x | |
| | Fosforo | | | x | x | x | x | x | |
| | Oxigênio dissolvido | | | | x | x | x | x | |
| | DBO/DQO | | | x | x | x | x | x | |
| | Micropoluentes orgânicos | x | x | x | x | x | x | x | |
| | Micropoluentes inorgânicos | x | x | x | x | x | x | x | |
| | Biológicas | Organismos indicadores | x | x | x | x | x | x | x |
| | | Algas | x | | | x | | x | |
| Bactérias decompositoras | | | | | x | | | | |

Fonte: Adaptado de Von Sperling, 2005; Righetto, 2017; Salgado, 2013; Ferreira, 2008.

A fim de entender as causas das alterações da qualidade das águas pluviais e seus perigos, deve-se observar a origem do escoamento superficial gerado e drenado pela rede. As fontes de poluição dos corpos hídricos podem ser de origem pontual ou não (difusa), como mostrado na Figura 3.5. As fontes pontuais podem ser devido à lançamentos irregulares de esgoto, entre outras, e as fontes difusas podem ser provenientes da lavagem das ruas através do escoamento superficial das águas pluviais, entre outras.

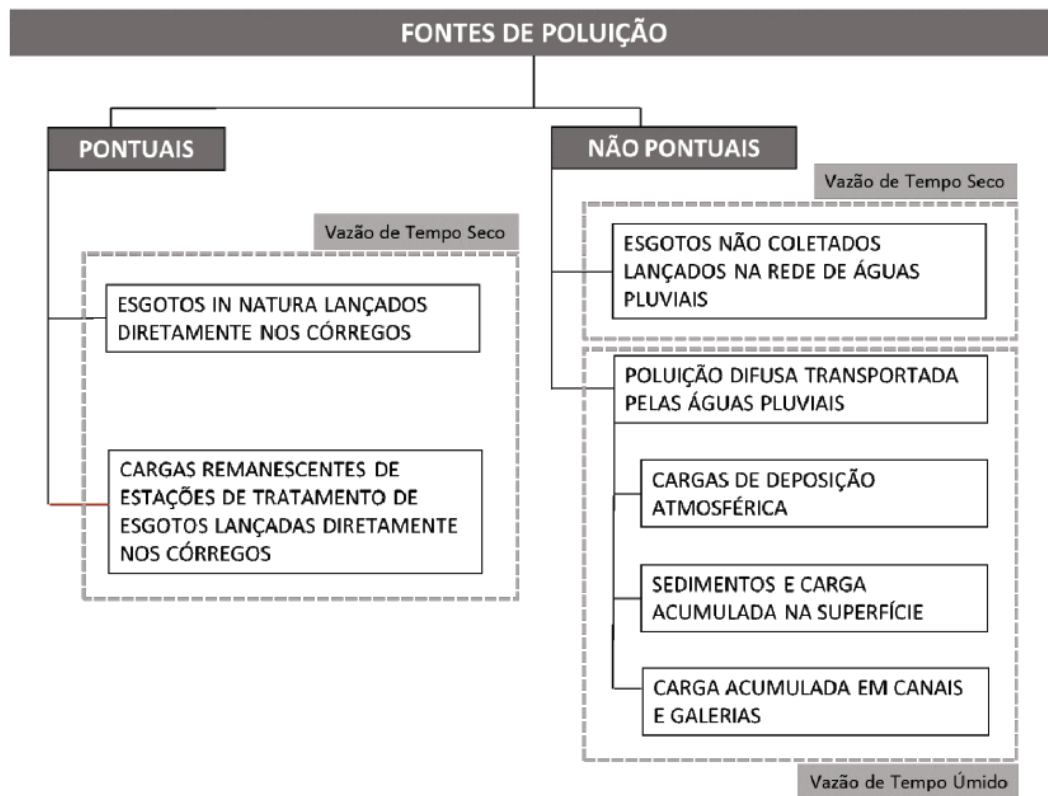


Figura 3.5 – Fontes de poluição hídrica típicas de área urbana (Adasa, 2018).

As fontes difusas de poluição são as mais observadas nos sistemas de drenagem urbana. A poluição difusa é um processo que ocorre com a lavagem e o transporte de poluentes atmosféricos pela chuva, formando deflúvios superficiais que carregam grande parte dos poluentes depositados na superfície para as estruturas de drenagem e corpos receptores. Ao contrário das fontes pontuais, a poluição difusa é um fenômeno aleatório de difícil mensuração por depender de aspectos como fatores meteorológicos e do tipo de uso e ocupação do solo (Freitas, 2013).

Segundo Tucci (2005), a qualidade das águas de redes pluviais está sujeita à vários fatores, como: a limpeza urbana e sua frequência de operação; a intensidade das precipitações e suas distribuições espaciais e temporais; e o período do ano (chuvoso ou seco). A composição das águas pluviais também pode variar de acordo com a localização geográfica, o nível da camada vegetal presente e a presença de carga poluidora (Righetto, 2009).

Uma característica significativa em sistemas de drenagem é a primeira carga de lavagem nos primeiros fluxos de águas pluviais, *first flush*, que pode conter cargas de poluentes particularmente elevadas. O *first flush* ocorre através da lavagem: da superfície da bacia de contribuição e da rede em si que possuem poluentes e resíduos acumulados desde

o último período de chuva e; de águas residuais de ligações clandestinas na rede pluvial, que possuem menor fluxo (Butler & Davies, 2011).

As principais fontes da poluição difusa incluem: emissões de veículos, corrosão e abrasão; corrosão e erosão de edifícios e estradas; fezes de aves e animais; deposição de serapilheira, folhas caídas e resíduos de grama; e derrames de óleos, graxas, produtos de limpeza doméstica e outros tipos de resíduos (Butler & Davies, 2011). Dentre todos os parâmetros de qualidade da água ligados a poluição difusa destaca-se a análise de SS.

Os sedimentos produzidos nas bacias hidrográficas são carreados para os cursos d'água. Em eventos de chuva, seu escoamento superficial produzido transporta partículas aos rios e esse sedimento é levado em suspensão ou pelo leito, rolando, deslizando ou saltando. As partículas finas como argila e silte são as encontradas em maior quantidade em suspensão na massa d'água transportada, representando entre 70% a 95% da carga sólida total de sedimentos; cargas essas que são de fácil determinação em laboratório justamente por sua grande quantidade (Carvalho, 2008).

As descargas de SST (Q_{ss} , ton/dia) obtidas por amostragem podem ser estimadas a partir da Equação 3.1.

$$Q_{ss} = 0,0864 \cdot Q \cdot C_{ss} \quad \text{Equação 3.1}$$

onde, Q a descarga líquida (m^3/s) e C_{ss} a concentração de sedimento em suspensão (mg/l).

Com os dados obtidos a partir de amostras é possível obter a relação da curva-chave de sedimentos para o local estudado. Esse processo, contudo, apresenta certas dificuldades e incertezas. Há incertezas que podem interferir na estimativa das cargas de SST a partir do registro da vazão, diminuído a representatividade da curva construída. Embora haja relação entre as duas variáveis, a variabilidade da carga de SS depende de mais fatores além da vazão, assim a relação carga vazão apresenta seus problemas de representação. Há o potencial erro advindo dos procedimentos de medições em campo e determinações laboratoriais. Na extrapolação da curva para vazões elevadas, em que não há quantidade significativa de dados observados, torna menor a representatividade da mesma nos casos de maior vazão (Merten *et al.*, 2007).

A qualidade dos dados da curva-chave é fundamental para que se possa representar as variações de vazões e cargas em diferentes épocas do ano. Para tal, as amostragens devem ser obtidas de forma frequente, principalmente nos períodos de maior precipitação, podendo

representar a variação da concentração de sedimentos de maneira mais fidedigna (Merten *et al.*, 2007).

Diversos estudos procuram avaliar a qualidade das águas pluviais e os efeitos da poluição difusa. Também há várias pesquisas que buscam entender mais a fundo o fenômeno de *first flush* para auxiliar em melhores planos e projetos de manejo de águas pluviais.

Righetto *et al.* (2017) avaliaram o *first flush* de uma bacia de retenção urbana num bairro da cidade de Natal, Rio Grande do Norte. Os aspectos qualitativos das águas de escoamento superficial analisados foram: DQO, FT, teor de óleos e graxas, ST e SST. A remoção de poluentes pela primeira carga de lavagem nos primeiros 30% do volume pluvial escoado resultou nos seguintes percentuais em massa: ST, 50%; SS, 50%; DQO, 49%; FT, 41%; óleos e graxas, 53%. Os resultados mostraram que o conceito de first flush pode ser utilizado para a aplicação de estratégias de manejo de águas pluviais.

Salgado (2013) avaliou a qualidade e a quantidade das águas pluviais e das cargas poluidoras no Córrego Botafogo em Goiânia, Goiás, nos períodos seco e chuvoso. Foram analisados os parâmetros de temperatura, pH, condutividade, DQO, DBO₅, OD, cor, turbidez, ST, SS, SST, SDT, nitrogênio amoniacal, coliformes totais e *Escherichia coli*. Nos cinco eventos de chuva monitorados observou-se grandes oscilações na concentração dos parâmetros, em especial coliformes totais, *Escherichia coli*, SST e turbidez. Avaliando o *first flush*, os resultados apontam que a DBO₅, DQO, turbidez e ST se apresentam como os melhores parâmetros indicadores do fenômeno.

Ferreira (2008) estudou a variação da qualidade da água de duas bacias de drenagem na cidade de Natal, Rio Grande do Norte, para subsidiar a aplicação de práticas de drenagem que considerem o aspecto qualitativo. As bacias de retenção analisadas são do tipo fechadas, em área urbana, com ocupação residencial predominante e suas águas pluviais são destinadas para lagoas de retenção e infiltração. Foram analisados os parâmetros de pH, condutividade, OD, cor, turbidez, DQO, amônia, nitrito, nitrato, FT, ortofosfato, sólidos sedimentáveis, ST, cloretos, sulfatos, alcalinidade, cálcio, magnésio, sódio, potássio, metais pesados (cromo, cádmio, chumbo, zinco e cobre), *Escherichia coli* e coliformes totais. Os parâmetros estudados apresentaram elevada carga poluidora inicial, *first flush*, com exceção do nitrito, dos metais e dos indicadores biológicos (regra do paralelismo).

Paz *et al.* (2004) avaliaram a influência do escoamento superficial na qualidade das águas na Bacia Hidrográfica Alto da Colina com características rurais e urbanas no município de Santa Maria, Rio Grande do Sul. As amostras de qualidade da água foram coletadas em tempo seco e chuvoso, em duas áreas de amostragem – uma com características rurais e outra com características urbanas. Os parâmetros analisados foram turbidez, condutividade, pH, temperatura, DBO₅, OD e coliformes totais e fecais. Os resultados mostram uma maior contaminação das águas nas áreas urbanas pela presença de maior conteúdo orgânico e bacteriológico. Durante o evento de precipitação houve maior concentração de coliformes totais e fecais no início do escoamento. Nas áreas rurais obteve-se níveis baixos de poluição por matéria orgânica e bacteriológica no período de seca. Devido a lavagem do solo provocada pelo escoamento superficial os níveis aumentaram nos eventos chuvosos.

3.4 MODELOS COMPUTACIONAIS PARA DRENAGEM URBANA

Os modelos computacionais se apresentam como ferramentas bastante úteis nas mais diversas áreas de estudo inclusive na gestão das águas pluviais. Estes modelos podem servir de fundamento à diversos propósitos, como: planejamentos e detalhamentos de projetos; manutenção corretiva com realizações de obras complementares e; simulação do comportamento de diferentes cenários de um sistema de drenagem com diversas combinações das variáveis envolvidas (Righetto, 2009).

O objetivo dos modelos na engenharia de drenagem urbana é representar um sistema de drenagem e sua resposta a diferentes condições a fim de fundamentar conjuntos de decisões. Os programas de computador para projeto e análise de drenagem surgiram na década de 1970, mas os modelos complexos só se tornaram ferramentas padrão dos engenheiros de drenagem quando a capacidade de processamento computacional foi aprimorada e o acesso aos computadores se tornou mais fácil (Butler & Davies, 2011).

Os modelos podem considerar os diversos processos físicos da natureza, como precipitação, infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial. Dessa forma, pode-se obter respostas de variáveis interessadas e da influência desses processos com a rede de drenagem de águas pluviais através da entrada de dados e análises de outras variáveis já conhecidas ou determinadas (Beling, 2013).

Os modelos matemáticos incorporam diversas análises e ferramentas para auxiliar e facilitar a sua utilização, produzindo resultados melhores e mais confiáveis. Eles incluem

aspectos hidrológicos, hidráulicos, quantitativos e qualitativos das águas pluviais, além de incorporar ferramentas como o Sistema de Informações Geográficas (SIG).

No presente, existem diversos modelos computacionais comercializados em conjunto, formando pacotes, com outros modelos para planejamento e gerenciamento da drenagem urbana. Estes modelos englobam vários aspectos relevantes na drenagem urbana, como: análise do escoamento (velocidades, níveis, vazões, volumes); modelos hidrológicos que relacionam chuva-vazão e modelos de qualidade da água; avaliação do transporte de sedimentos na rede; funcionamento de bombas, vertedores e bueiros; análise da implementação de diferentes medidas estruturais e não estruturais de controle do escoamento; identificação e áreas inundáveis; análise estatísticas dos dados e; apresentação de mapas (Righetto, 2009).

Há modelos para o planejamento, dimensionamento e operação de sistemas de drenagem. Os modelos para planejamento são empregados na fase de concepção do projeto a fim de analisar custos e viabilidade técnica de implantação. Os modelos para dimensionamento são utilizados de modo a definir quais as dimensões das estruturas do sistema, como redes de condutos, canais, lagoas de retenção, dentre outras. Os modelos para operação possibilitam análise detalhada e admitem a definição de regras de operação das estruturas de controle e do escoamento na rede de condutos (Zoppou, 2001 *apud* Righetto, 2009).

O modelo SWMM se apresenta como o programa computacional mais empregado atualmente na simulação da drenagem urbana, por ser de domínio público e possuir seu código de programação aberto, podendo ser modificado pelos usuários avançados (Righetto, 2009). O modelo SWMM foi utilizado no desenvolvimento deste trabalho e é descrito a seguir.

3.4.1 Modelo SWMM (*Storm Water Management Model*)

O *Storm Water Management Model* (SWMM) é um modelo dinâmico de chuva-vazão que te possibilita simular aspectos quantitativos e qualitativos do escoamento superficial em sistemas de drenagem urbana. O modelo pode simular tanto eventos chuvosos únicos como contínuos. Esse programa foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*Environmental Protection Agency* - EPA) em 1971 e continua recebendo várias atualizações tanto da própria agência como de empresas

desenvolvedoras de softwares e colaboradores por ser de código aberto (Rossman, 2015). O software pode ser obtido de forma gratuita através do site oficial da EPA.

Existem alguns pacotes computacionais que incorporam o modelo SWMM, como o PCSWMM desenvolvido pela CHI. Esse pacote apresenta uma boa interface de trabalho que possibilita utilizá-lo de forma mais fácil e fluída. O PCSWMM incorpora a ferramenta de geoprocessamento facilitando seu uso e aplicação na concepção de planos e projetos de manejo de águas pluviais. Ele também efetua uma análise de sensibilidade ao verificar a variação dos parâmetros de acordo com as alterações das condições do sistema em estudo (Beling, 2013; Souza, 2014).

O modelo SWMM permite realizar simulações hidrológicas, hidráulicas e de transporte das substâncias que alteram a qualidade da água em sistemas de drenagem. Ele apresenta quatro módulos principais: o atmosférico, referente a precipitação e deposição de poluentes; o da superfície do solo, quanto ao escoamento superficial, evaporação e infiltração; o de águas subterrâneas, referente ao fluxo de base e; o de transporte e tratamento, onde observa-se infraestruturas da rede de drenagem, como os canais, condutos, unidades de armazenamento e tratamento (Rossman, 2016).

De acordo com Righetto (2009), para utilizar o software necessita-se de alguns dados de entradas de acordo com o que se deseja obter de resultado, como:

- precipitação pluviométrica;
- áreas de contribuição - declividade média, área, percentual de permeabilidade do solo; entre outros;
- poços de visita - cotas, profundidade, entre outros;
- tubulações - seção, diâmetro, comprimento e mais;
- nível do lençol freático, poços de bombeamento, dentre outros.

O modelo SWMM é utilizado em vários estudos dos sistemas de drenagem de água pluvial, como: na concepção e dimensionamento de componentes da rede de drenagem visando evitar inundações; no dimensionamento de estruturas de retenção para o controle de inundações e preservação da qualidade da água; na análise de eficiência das medidas alternativas na redução das cargas de poluentes de origens difusas, como trincheiras de infiltração, telhados verdes e outras (Huber *et al.*, 2005).

Outro aspecto importante nos estudos da drenagem urbana é o uso e ocupação do solo na bacia de contribuição. Os tipos de uso do solo no SWMM são separados de acordo com o desenvolvimento urbano ou as características locais da superfície, do solo e do relevo na área de contribuição da bacia. Pode-se definir as áreas como residenciais, comerciais, industriais e não urbanizadas. Quanto às características de superfície, há como definir telhados, ruas pavimentadas, jardins, solos em desuso, entre outros. Os usos de solo necessitam ser definidos de forma correta a fim de obter a variação espacial das taxas de acúmulo e da água de lavagem dos poluentes na bacia estudada (Righetto, 2009).

Segundo Rossman (2016), em relação à qualidade da água, o SWMM possibilita modelar diversos processos com diferentes combinações das substâncias relevantes à qualidade da água de acordo com a definição do usuário, como:

- acumulação do poluente durante o tempo seco, considerando diferentes tipos de uso do solo;
- lavagem de poluentes pela água da chuva nos diferentes tipos de uso do solo em eventos de chuva;
- contribuição direta proveniente da própria chuva;
- redução da poluição acumulada devido à limpeza das ruas;
- redução da carga de poluentes carregada devido às boas práticas de manejo (*Best Management Practices* - BMPs);
- entrada de águas residuárias em tempo seco e outras contribuições externas em qualquer ponto do sistema de drenagem de acordo com indicações do usuário;
- propagação de substâncias associadas à qualidade da água ao longo do sistema de drenagem;
- redução na concentração do poluente por meio de tratamentos em reservatórios ou devido a processos naturais em tubulações e canais;

O programa permite a definição de poluentes como objetos para análises de qualidade da água. Pode-se definir inúmeros poluentes para uma simulação desde que: eles possam ser expressos como uma concentração de massa ou número (para organismos biológicos) por volume de água e; as suas massas sejam aditivas, ou seja, a carga de dois volumes iguais de água misturados equivale a média das concentrações individuais (Rossman, 2016).

De acordo com Beling (2013), o SWMM consegue representar a dinâmica de acumulação e lavagem de poluentes, como sedimentos em suspensão, coliformes, matéria orgânica e inorgânica (DBO e DQO) e metais.

A acumulação é dada quando a massa de poluentes é incrementada em períodos de seca. Ela pode ser representada com relação matemática exponencial, potencial ou uma função de saturação, como mostra a Tabela 3.5. O volume acumulado calculado pode ser relacionado com a área total das sub-bacias ou ao comprimento do meio-fio das ruas, tendo como variável independente o período antecedente seco (Beling, 2013).

Tabela 3.5 – Funções para cálculo de acúmulo de poluentes.

| OPÇÕES DE CÁLCULO | EQUAÇÃO | PARÂMETROS | EXPLICAÇÃO |
|---------------------------|------------------------------------|---|---|
| Função potência | $B = \text{Min}(C_1, C_2 t^{C_3})$ | C_1 – acumulação máxima possível (ML ⁻²) C_2 – cte de crescimento do poluente acumulado C_3 – expoente do tempo | A acumulação do poluente “B” é proporcional ao tempo elevado a uma potência até atingir um valor máximo. |
| Função exponencial | $B = C_1(1 - e^{-C_2 t})$ | C_1 – acumulação máxima possível (ML ⁻²) C_2 – cte de crescimento do poluente acumulado (1/dia) | Comporta-se como uma acumulação exponencial que se aproxima assintoticamente a um determinado valor máximo. |
| Função saturação | $B = \frac{C_1 \cdot t}{C_2 + t}$ | C_1 – acumulação máxima possível (ML ⁻²) C_2 – cte de semi-saturação (nº de dias necessários para alcançar a metade da acumulação possível). | Começa de forma linear e progressivamente diminui ao longo do tempo até alcançar um determinado valor de saturação. |

Fonte: Costa, 2013.

Como os dados de acúmulo indicam que diferentes taxas se aplicam aos diferentes usos da terra, o SWMM permite definir diferentes funções de acúmulo e lavagem para cada combinação de poluentes e uso da terra. A definição do uso e ocupação da terra serve para identificar os tipos específicos de uso da terra e armazenar as funções de acumulação (e lavagem) para cada poluente no SWMM. Usos da terra são categorias de atividades de desenvolvimento ou características da superfície da terra atribuídas a sub-bacia – áreas comerciais, industriais, residenciais, parques, estacionamentos, dentre outras (Rossman, 2016).

O usuário do SWMM tem diversas opções para definir os tipos de uso da terra e atribuí-los às áreas de cada sub-bacia. Uma abordagem é atribuir uma mistura de usos da terra para cada sub-bacia, classificando sub-bacias de acordo com as mesmas características de permeabilidade. Outra abordagem é criar sub-bacias que tenham a mesma classificação

de uso do solo, juntamente com um conjunto distinto de características de permeabilidade que reflitam a classificação (Rossman, 2016).

Quando o escoamento superficial carrega os poluentes na direção do fluxo, ocorre a lavagem da carga acumulada nas sub-bacias. Pode-se representar esse processo no SWMM através de uma função exponencial, curva de taxa de lavagem ou concentração média do evento, como na Tabela 3.6 (Beling, 2013).

Tabela 3.6 – Funções para cálculo da lavagem de poluentes.

| OPÇÕES DE CÁLCULO | EQUAÇÃO | PARÂMETROS | EXPLICAÇÃO |
|-------------------------------------|---------------------------------|--|---|
| Exponencial | $W = C_1 \cdot q^{C_2} \cdot B$ | C_1 – coeficiente de lixiviação C_2 – expoente de lixiviação Q – escoamento por un. de área (mm/h) B – acum. do agente poluente | A carga lixiviada W (MT^{-1}) é proporcional ao produto do escoamento elevado a uma potência, pela quantidade de agente poluente acumulado. |
| Curva de Taxa de lixiviação | $W = C_1 Q^{C_2}$ | C_1 – coeficiente de lixiviação C_2 – expoente de lixiviação Q – escoamento | $W(MT^{-1})$ é proporcional à vazão de escoamento, elevado a uma potência. |
| Concentração média do evento | $W = C_1 Q^{C_2}$ | $C_2=1$ C_1 - representa a concentração de poluente lixiviado em massa/L | Caso especial da curva de taxa de lixiviação. |

Fonte: Costa, 2013.

A utilização do SWMM na avaliação da qualidade dos escoamentos pluviais em cidades brasileiras tem se mostrado muito relevante e promissora. Todavia, deve-se alcançar um melhor nível de conhecimento e monitoramento dos processos e variáveis relevantes na dinâmica quali-quantitativa das redes de drenagem (Righetto, 2009). O SWMM é produto de uma série de resultados reunidos obtidos através de diversas pesquisas realizadas nos Estados Unidos. Dessa forma, necessita-se calibrar e validar o modelo às condições brasileiras para que se possa utilizar o software em diagnósticos, prognósticos e definições quanto à qualidade da água com mais segurança e confiabilidade.

Beling (2013) realizou a modelagem quali-quantitativa da bacia urbana do Arroio Cancela, em Santa Maria – Rio Grande do Sul, com o uso do modelo SWMM. Modelou-se os processos de geração e propagação do escoamento superficial e de base, além de processos de acumulação e lavagem do total de sedimentos em suspensão e da matéria orgânica representada pela demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5). Os resultados obtidos no estudo apontam que a utilização do SWMM em conjunto com o calibrador PEST (Parameter Estimator) gera bons resultados, avaliando os índices de eficiência de Nash-Sutcliffe, para predição do escoamento superficial em eventos isolados e em séries

contínuas. Os resultados dos processos qualitativos não se mostraram tão satisfatórios e necessitam de melhores estimativas dos parâmetros iniciais de acumulação e lavagem.

Pehovaz (2010) avaliou quali-quantitativamente uma bacia urbana localizada na cidade de São Carlos - SP, em termos experimentais e de modelagem matemática por meio do SWMM. Foram discutidos os resultados de parâmetros físico-químicos, biológicos e metais presentes na água. Ele aponta que se pode aplicar o modelo matemático utilizado quali-quantitativamente, para uma bacia urbana, por meio da calibração dos hidrogramas simulados com hidrogramas observados, e a obtenção de resultados de concentrações de OD, fosfato, ST, DQO e DBO presentes na água do rio. Apesar dos resultados experimentais estarem próximos dos simulados, observa-se variações temporais nas cargas específicas.

Souza (2014) estudou o comportamento quali-quantitativo das águas de drenagem urbana por meio do monitoramento da precipitação e do escoamento superficial da sub-bacia do Iate Clube e do Centro Olímpico, em Brasília – DF, e utilizando os programas SWMM e PCSWMM para modelagem e simulação. O trabalho apresentou bons resultados para modelagem de vazão. Todavia, segundo a autora, nas simulações de qualidade, observou-se uma menor eficiência do modelo. Foram simuladas implantações de bacias de retenção para observar o potencial de remoção de poluentes e as possíveis influências na rede. Como resultado, as bacias de retenção a jusante da rede se mostraram mais eficientes com redução de até 30% nos picos de cheia, apesar de requererem maiores áreas.

Tominaga (2013) analisou através do PCSWMM quais os efeitos da implantação de medidas de controle na fonte no abatimento dos picos de cheia em áreas urbanas de alta densidade demográfica, mais especificamente a bacia do córrego da Luz no centro da cidade de São Paulo. Foram simulados pavimentos permeáveis, telhados verdes e jardins de chuva. Simulou-se cenários da situação atual sem implantação de medidas de controle, com implantação individual e com combinação das medidas. A modelagem permitiu apontar um amortecimento dos picos de cheia em todos cenários em diferentes graus e o melhor desempenho no abatimento se deu nos cenários com implantação de pavimentos permeáveis. Frente aos resultados, os pavimentos permeáveis se apresentam como opção de melhor custo-benefício. O autor cita que o pavimento permeável não é aplicável na totalidade da área, logo deve-se fazer uma combinação de medidas.

Costa (2013) analisou o comportamento quantitativo e qualitativo das águas de drenagem urbana nas sub-bacias do Centro Olímpico e do Iate, em Brasília – DF, por meio

do monitoramento da precipitação e do escoamento superficial de eventos de cheia, além de modelagem com o SWMM. A autora verificou a aplicação do modelo para o tipo de bacia estudada, mas aponta necessidade de melhor calibração. O modelo se mostrou válido para análise do escoamento superficial gerado em bacias urbanas e para estimar vazões quando calibrado para o evento estudado. A qualidade da água analisada resultou em cargas de poluição difusa mais significativas que as cargas do esgoto tratado lançada no Lago Paranoá nos meses de novembro e janeiro. Os parâmetros de qualidade da água utilizados foram DQO e SS.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada uma caracterização da área de estudo e as metodologias utilizadas a fim de alcançar os objetivos definidos previamente. Expõe-se as formas com que se realizou a instalação dos equipamentos necessários, os monitoramentos quantitativos e qualitativos das águas pluviais na área de estudo, além da forma com que se fez a simulação matemática através do pacote PCSWMM.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O objeto do presente estudo situa-se na Região Administrativa do Guará II, Distrito Federal, no Setor de Oficinas Sul, inserida dentro do Parque Ezechias Heringer. Em termos hidrográficos, localiza-se na unidade hidrográfica do Riacho Fundo componente da bacia hidrográfica do Lago Paranoá, como mostrado nas Figuras 4.1 e 4.2.

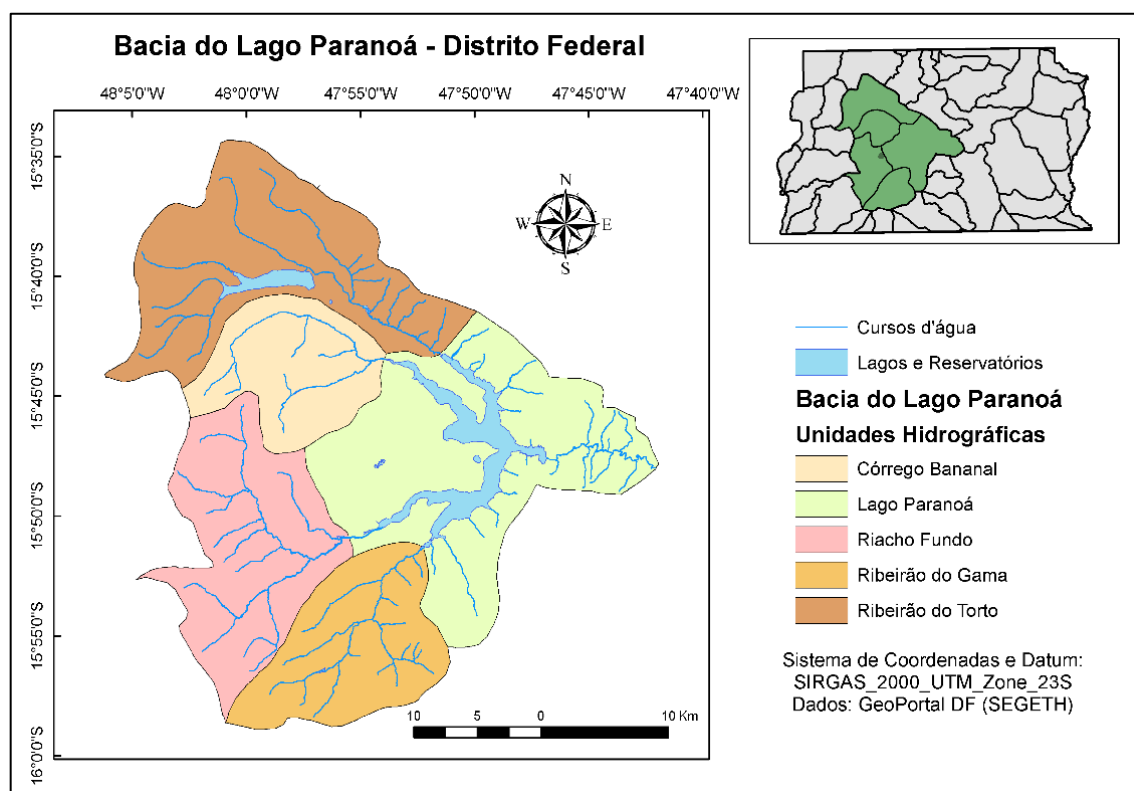


Figura 4.1 – Mapa da Bacia do Lago Paranoá – Distrito Federal.

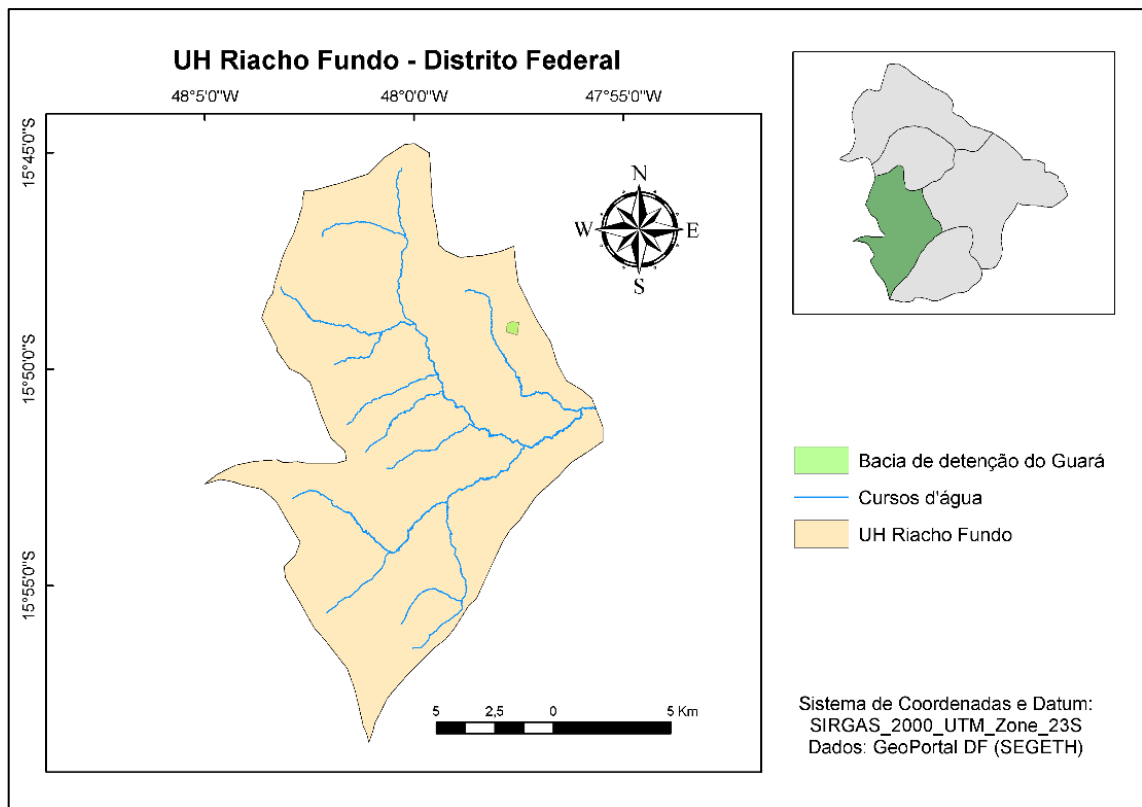


Figura 4.2 – Mapa da Unidade Hidrográfica Riacho Fundo – Distrito Federal.

A lagoa de retenção tem como área de contribuição o Cruzeiro Velho e Novo, Octogonal, Ceasa, Setor de Indústria e Abastecimento (SIA), Setor Policial Sul, Instituto Nacional de Meteorologia, fração do Sudoeste, Hospital das Forças Armadas, Subestação de Furnas e do antigo Serviço Nacional de Informações, assim abrangendo uma área de contribuição de 12,25 km² segundo o projeto da ArKIS (2005).

A delimitação da área de contribuição a ser utilizada no estudo foi concebida no trabalho da Volken (2018) de acordo com o levantamento e construção da rede de drenagem contribuinte realizado pela mesma, Figura 4.3. A partir da construção da rede, Volken (2018) determinou a bacia de contribuição para os dispositivos da rede, Figura 4.4. Essa bacia compreende uma área de aproximadamente 7,4 km². Assim, há uma diferença entre a área da bacia de contribuição projetada e a delimitada. Isso ocorre possivelmente devido ao fato de que a rede de drenagem não alcança toda a perspectiva do projeto.

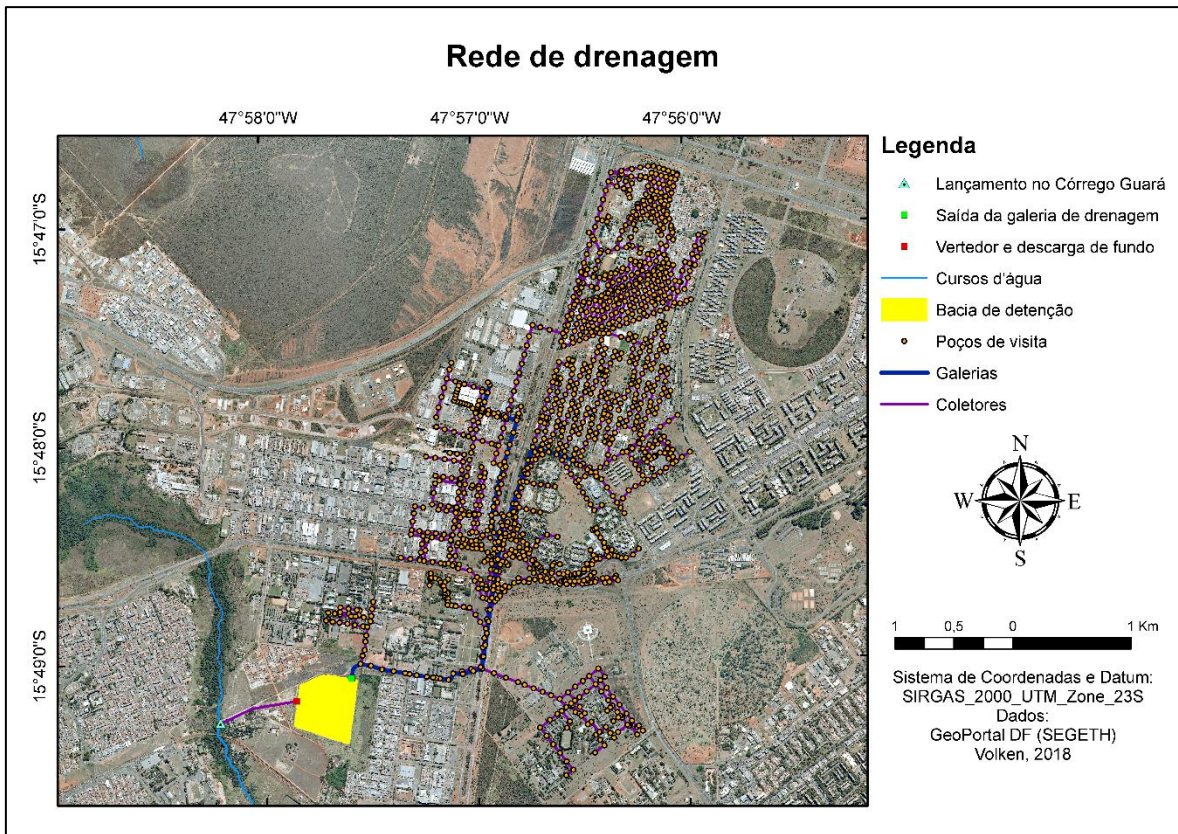


Figura 4.3 – Mapa da rede de drenagem.



Figura 4.4 – Mapa da área da bacia de drenagem.

A lagoa de detenção estudada, que anteriormente funcionava como lagoa de estabilização da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb), apresenta uma área aproximada de 24 hectares. A lagoa de estabilização desativada pela Caesb era composta por quatro células, sendo 3 menores e uma maior, como pode-se observar na Figura 4.5.

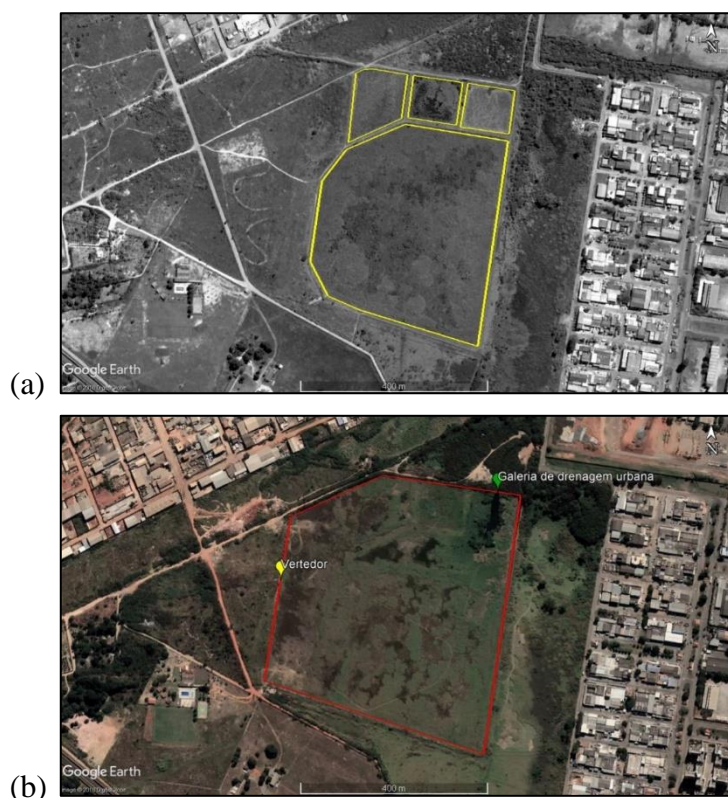


Figura 4.5 – a) Lagoa de Estabilização desativada, abril de 2004; b) Lagoa de detenção, junho de 2018. Fonte: Google Earth.

A lagoa de detenção foi implantada como medida para reduzir as vazões de pico, evitar processos erosivos a jusante, propiciar a sedimentação de partículas sólidas provenientes das águas pluviais drenadas (ArKIS, 2005).

O Córrego Guará que recebe as águas da lagoa foi classificado pelo Conselho de Recursos Hídricos do Distrito Federal, através da Resolução CRH/ DF nº 02, de dezembro de 2014, como um corpo hídrico de água doce da classe 2 de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005. A Resolução CONAMA estabelece que essa classe pode ser destinada:

“a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; b) à proteção das comunidades aquáticas; c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA no 274, de 2000; d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins,

campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e e) à aquicultura e à atividade de pesca.”

Em visita realizada no dia 18 de agosto de 2018 ao local de estudo pôde-se observar a presença de resíduos sólidos, dejetos humanos, óleos e graxas na saída da galeria de drenagem (Figura 4.6). O ambiente também estava com um odor desagradável. Esse fato pode ter ocorrido devido às águas de lavagem provenientes de um evento chuvoso ocorrido anteriormente e que conseqüentemente carregou poluição difusa. Vale ressaltar que era um evento chuvoso após o período de seca. Pôde-se observar também que uma grande quantidade de carga de sedimentos fica depositada na lagoa de detenção no período de seca (Figura 4.6).

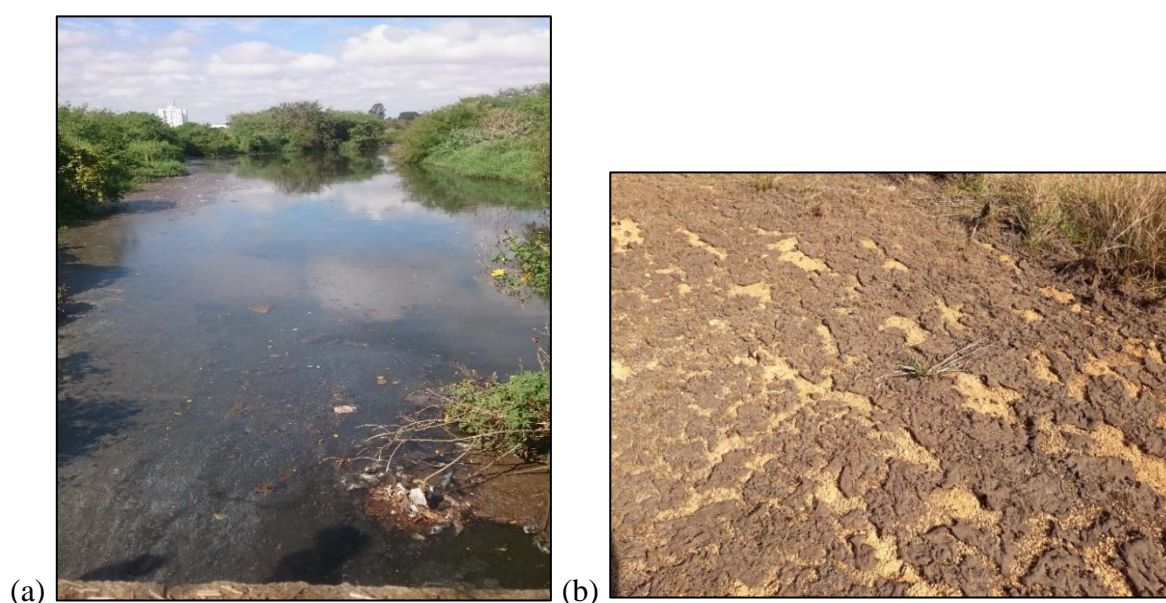


Figura 4.6 – a) Saída da galeria de drenagem urbana após evento chuvoso em agosto de 2018; b) aglomerados de sedimentos secos depositados.

4.1.1 Clima e solo

A região em que se encontra o objeto de estudo tem como característica o clima Tropical com períodos sazonais bem definidos. Há um período mais seco, entre os meses de maio e setembro, e um período mais chuvoso, entre os meses de outubro e abril. A temperatura média anual varia entre 18° e 22° C, onde os meses de setembro e outubro são os mais quentes, enquanto o mais frio é o de julho (Ferrante *et al.*, 2001). A média anual pluviométrica é de aproximadamente 1500 mm de chuva, tendo o mês de dezembro como o mais chuvoso e o mês de junho com a menor precipitação média, como pode-se observar na Figura 4.7.

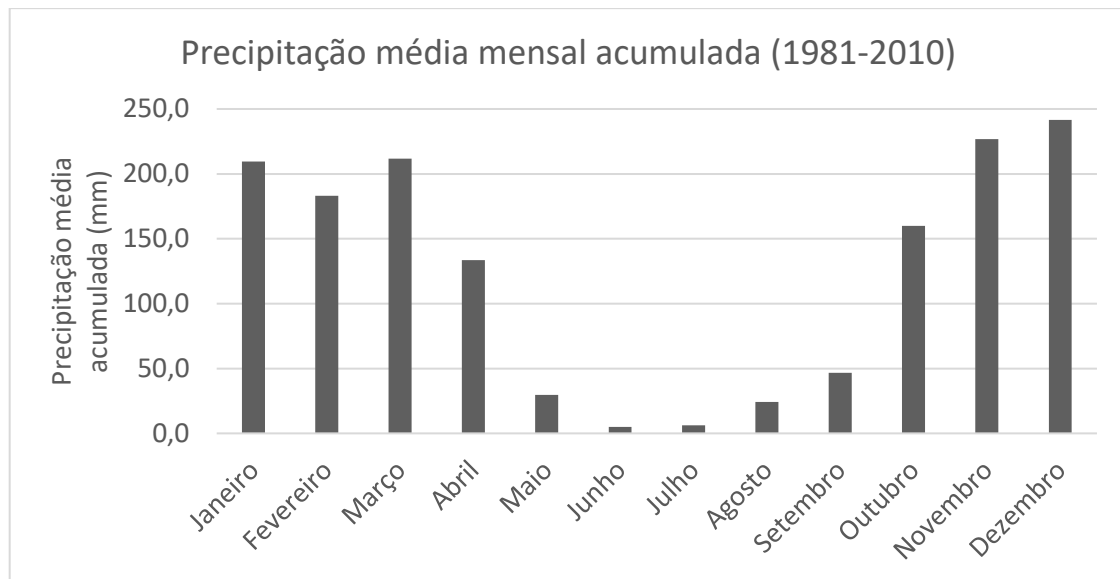


Figura 4.7 – Precipitação média mensal acumulada (mm) da série histórica de 1981-2010.
Fonte: INMET, 2018.

De acordo com estudo realizado pela Embrapa (Reatto *et al.*, 2004), o Distrito Federal apresenta três classes de solo que são observadas com maior frequência, sendo elas: Latossolos Vermelho (38,92), Latossolo Vermelho-Amarelo (15,98) e Cambissolo (30,98%). Esses solos são definidos como solos tropicais, vermelhos, ricos em ferro e alumínio, ácidos e pobres em macro e micronutrientes.

Na unidade hidrográfica do Riacho Fundo há seis tipos diferentes de solo, como observa-se na Figura 4.6, sendo eles: Latossolo Vermelho-Escuro, o mais presente dentre as classes; Cambissolo; Latossolo Vermelho-Amarelo; Solos Hidromórficos; Laterita Hidromórfica A com Solos Hidromórficos Indiscriminados e; Podzólico Vermelho-Amarelo Equivalente Eutrófico.

4.2 INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

Foram realizadas diversas saídas à campo a fim de instalar os equipamentos necessários para o desenvolvimento do estudo. A instalação dos equipamentos utilizados foi realizada em conjunto com uma equipe de colaboradores, alunos de graduação, iniciação científica, mestrado e doutorado que desenvolvem um conjunto de trabalhos na área de estudo.

4.2.1 Régua linimétrica

Foram instaladas régua linimétricas na seção da galeria de drenagem (entrada da lagoa) e nos dispositivos de saída da lagoa de detenção, descarga de fundo e vertedor, como

mostra a Figura 4.8. Assim pode-se medir os níveis de água nos pontos e posteriormente determinar a vazão das águas pluviais afluentes e efluentes à lagoa de retenção.

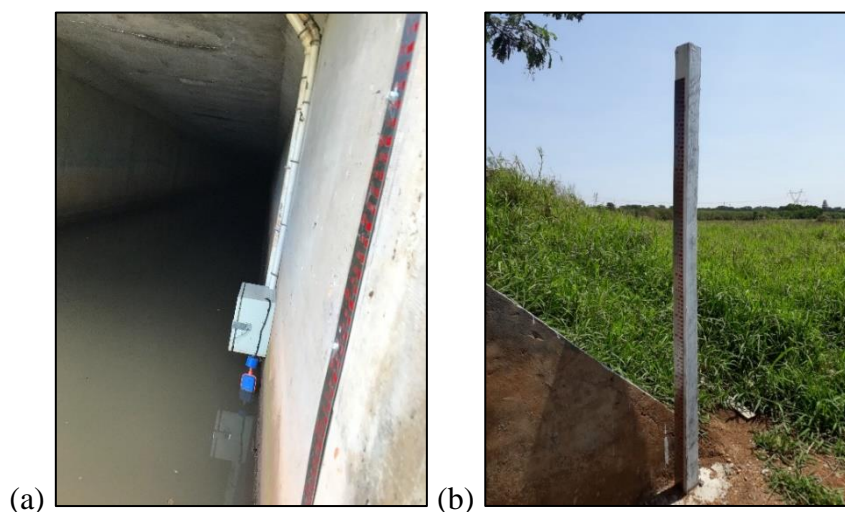


Figura 4.8 – a) Régua linimétrica na entrada da lagoa; b) régua linimétrica na descarga de fundo da lagoa.

4.2.2 Linígrafo de pressão

Foram instalados linígrafos de pressão na entrada e na saída da lagoa de retenção, para caso a água ultrapassasse o nível do vertedor, como mostra a Figura 4.9. Os equipamentos automáticos permitem a leitura dos níveis de água em períodos de tempo definidos pelo usuário. Dessa forma obteve-se a variação do nível de água nos eventos sem estar presente no momento e podendo coletar os dados posteriormente para análise.

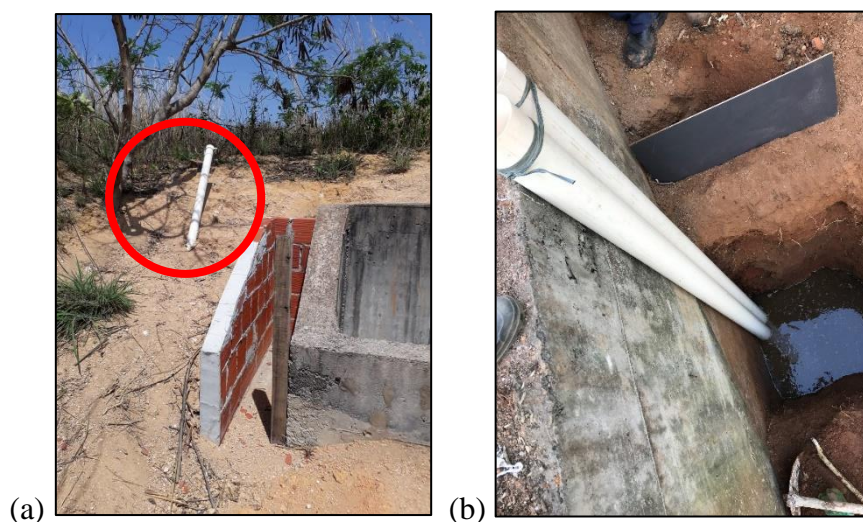


Figura 4.9 – a) Linígrafo de pressão a esquerda (tubo) no vertedor; b) tubo para linígrafo na entrada da lagoa.

4.2.3 Linígrafo de boia

Instalou-se um linígrafo de boia na descarga de fundo da lagoa para se obter os níveis de água de forma automática assim como o linígrafo de pressão. Na Figura 4.10 observa-se o linígrafo instalado na saída da lagoa.



Figura 4.10 – Linígrafo de boia instalado na saída da lagoa.

4.2.4 Pluviógrafo

Foram instalados cinco pluviógrafos basculantes, como o da Figura 4.11, para se aferir a lamina de água precipitada nos eventos a serem estudados. Os pluviógrafos estão localizados no Cruzeiro Velho, Cruzeiro Novo, Octogonal, SIA e próximo a lagoa de detenção, como mostra a Figura 4.12.



Figura 4.11 – Pluviógrafos instalados em telhados de prédios.

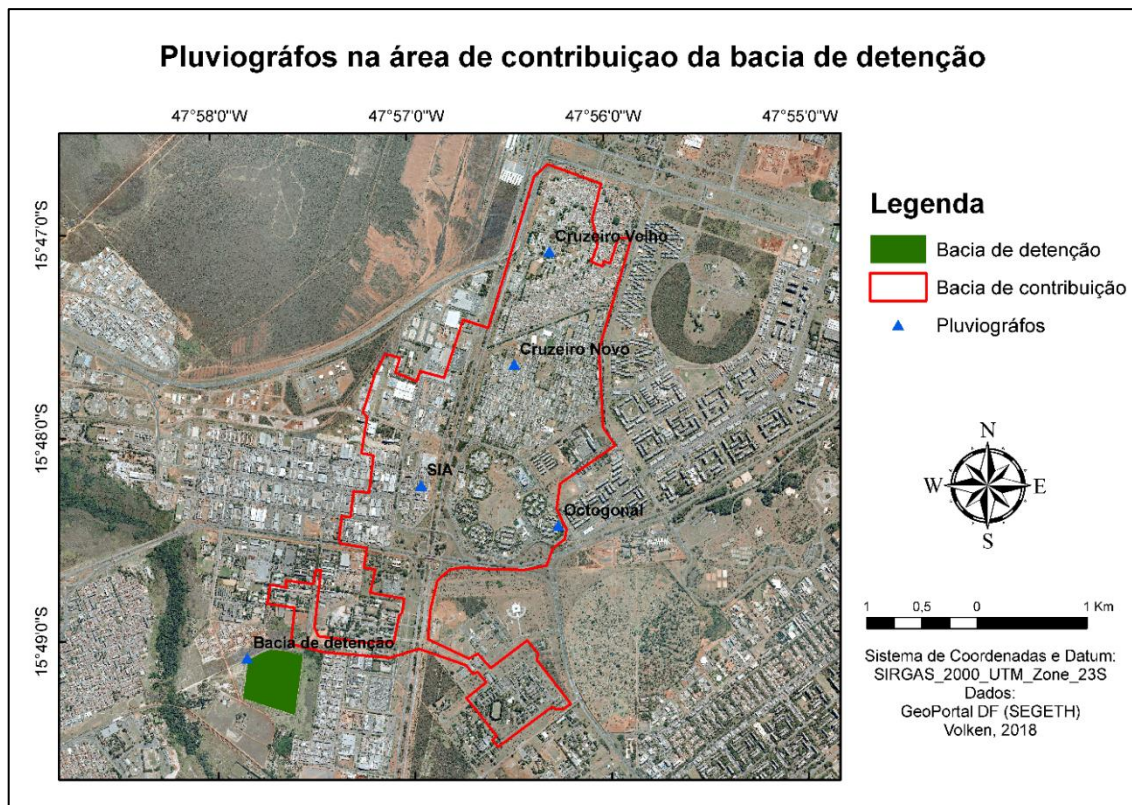


Figura 4.12 – Locais de instalação dos pluviôgrafos.

4.2.5 Amostrador automático ISCO

Foram instalados dois amostradores automáticos, modelo ISCO, um na entrada da lagoa e um no dispositivo de saída da lagoa de detenção (Figura 4.13). Eles estão ligados a boias que os ativam quando o escoamento superficial ultrapassa uma determinada cota de nível d'água estabelecida (Figura 4.14). Assim que o equipamento é ativado pelo sensor de nível, inicia-se a coleta de amostras com intervalos de tempos definidos pelo usuário, podendo colher até 24 amostras. Essas amostras são armazenadas em sacos plásticos próprios para o equipamento em seu interior.

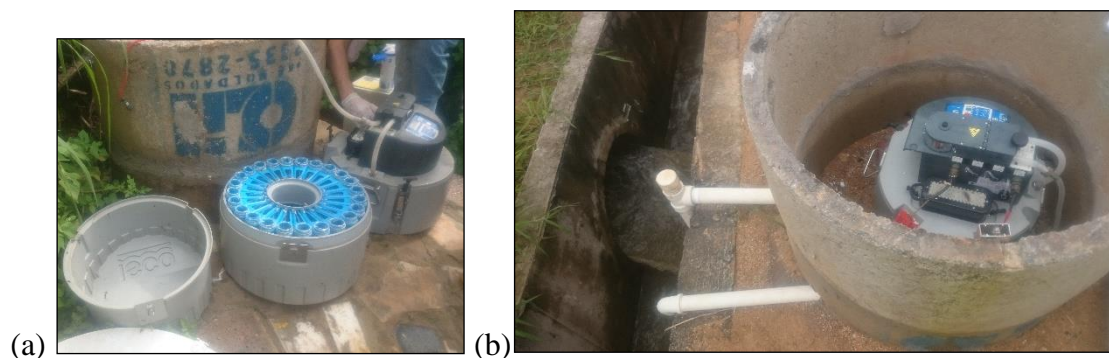


Figura 4.13 – Amostradores automáticos: a) galeria na entrada da lagoa; b) vertedor na saída da lagoa.



Figura 4.14 – Boias de ativação do amostrador automático no vertedor (esquerda) e galeria de drenagem na entrada da lagoa (direita).

4.3 MONITORAMENTO

Foram realizadas visitas aos locais da área de contribuição e na lagoa de detenção a fim de levantar dados quantitativos e qualitativos das águas pluviais. Os dados quantitativos são referentes aos valores das precipitações ocorridas na área de contribuição da rede de drenagem e das vazões geradas nos eventos chuvosos. Os dados qualitativos se deram por coleta de amostras e análises físico-químicas da água em laboratório.

4.3.1 Monitoramento quantitativo

Através de medições do nível da água com régua linimétrica e linígrafo de boia na seção da galeria de drenagem na entrada da lagoa se determinará a vazão das águas pluviais afluentes à lagoa de detenção. De acordo com o projeto (ArKIS, 2005), a saída da galeria de lançamento à lagoa de detenção é composta por três canais paralelos com 2,70 m de largura por 2,50 m de altura (Figura 4.15).

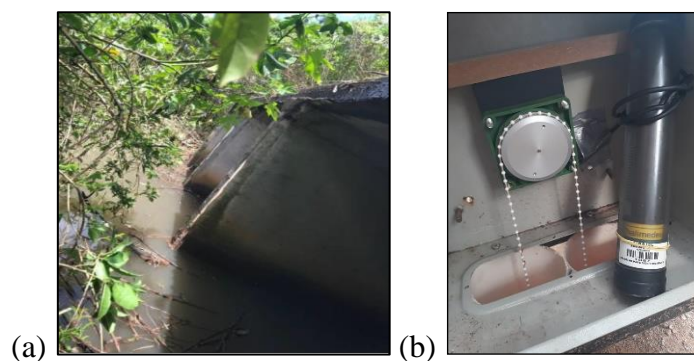


Figura 4.15 – a) Saída da galeria de drenagem na lagoa de detenção; b) linígrafo de boia na galeria de drenagem.

O dispositivo de saída implantado na lagoa de estudo é composto por um vertedor de 20 m de comprimento e uma descarga de fundo de 1 m de diâmetro, sendo ligados a uma tubulação de 1,50 m de diâmetro (Figura 4.16) que transporta as águas pluviais drenadas da lagoa de detenção ao Córrego Guará (ArKIS, 2005). Em caso de afogamento da descarga de fundo e o nível d'água ultrapasse o nível da soleira do vertedor na saída da lagoa, calcula-se tanto a vazão no bueiro quanto a vazão no vertedor para se obter a vazão total.



Figura 4.16 – a) vertedor da lagoa de detenção; b) entrada da descarga de fundo; c) águas pluviais escoando pela descarga de fundo do vertedor.

Realizou-se visitas à lagoa para medir o nível da água na régua linimétrica e fez-se a transferência dos dados dos linígrafos de boia e pressão instalados para o computador de campo, como mostra a Figura 4.17. Também ocorreram visitas periódicas nos pontos com pluviôgrafos instalados nas áreas de contribuição da rede de drenagem afluente à lagoa de detenção para se transferir os dados de precipitação dos eventos ocorridos e observar o nível de bateria dos equipamentos, como mostra a Figura 4.17.

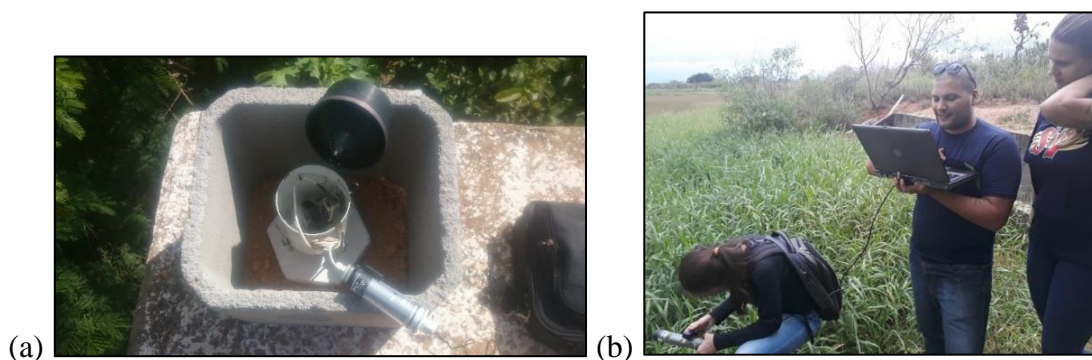


Figura 4.17 – Transferência de dados de pluviôgrafo (a) e linígrafo de boia (b).

Vale ressaltar que nas visitas realizadas para transferência de dados do linígrafo de boia na saída da lagoa para o computador houve problemas devido a falha de comunicação entre o computador de campo e o equipamento. O problema pode ser devido ao aquecimento por exposição ao sol da caixa que comporta o equipamento, esquentando os circuitos e

aparatos do dispositivo de modo a dificultar a conexão, ou algum problema nos cabos e conexões do computador. Dessa forma, a simples tarefa de coletar dados do equipamento demandava um tempo bem acima do esperado.

Foram realizadas visitas a lagoa para medição da velocidade do escoamento na descarga de fundo com a utilização de um molinete (Figura 4.18) e um ADC, que mede a velocidade por efeito *doppler*, e com o ADC na saída da galeria para se construir a relação cota x vazão na entrada da lagoa de detenção.



Figura 4.18 – Medição da velocidade do fluxo na saída da lagoa com molinete.

Foram realizadas medições em somente duas ocasiões de eventos chuvosos com o ADC na galeria de drenagem (entrada da lagoa) devido a necessidade de estar no local no período chuvoso do evento a fim de observar a onda de cheia. As medições foram feitas em um regime de plantão no qual se observava a probabilidade de chuva e ocorrência de evento para a coleta dos dados de velocidade. Fez-se leituras da velocidade do escoamento no centro de cada canal até que a onda de cheia passasse. Após a onda de cheia e estabilização do nível, considerou-se três verticais para medição da velocidade em cada canal. Com os dados dos eventos observados, De Paula (2018) construiu a curva-chave relacionando cota (H) em “m” e vazão (Q) em “m³/s” para a saída da galeria de drenagem na entrada da lagoa, dada pela Equação 4.1.

$$Q = 321,69 * H^{11,219} \quad (\text{Equação 4.1})$$

Foram realizadas diversas medições de velocidade na descarga de fundo da lagoa de detenção com molinete e ADC. O molinete apresentou defeito após um tempo de uso e passou-se a utilizar o ADC. A utilização do ADC demandava um preparo maior devido necessidade de um gerador para alimentá-lo dado que sua bateria não estava em pleno funcionamento. Uma vez que o escoamento no ponto é mais estável, foram consideradas

diferentes profundidades de medição (0,2; 0,4; 0,6; 0,8) de acordo com o nível d'água no momento da leitura nas 7 verticais previamente definidas com espaçamento simétrico. Com as velocidades nas diferentes verticais e profundidades pode-se definir as vazões parciais nas seções e conseqüentemente a vazão total. Com esses dados, De Paula (2018) construiu a curva-chave da descarga de fundo na saída da lagoa, expressa pela Equação 4.2.

$$Q = 1,1121H^{2,3615} \quad (\text{Equação 4.2})$$

4.3.2 Monitoramento qualitativo

O monitoramento qualitativo se deu através da coleta de amostras das águas pluviais a montante e a jusante da lagoa de detenção com os amostradores ISCO instalados e com análises laboratoriais de qualidade das amostras. Eram necessárias visitas periódicas aos locais para troca de baterias do equipamento, além da configuração do mesmo para realizar coletas automaticamente.

Constatando-se eventos de chuva na bacia de contribuição após a preparação do amostrador fez-se a verificação da ocorrência de coleta de amostras pelo equipamento através de visita ao local. Quando constatado a presença de amostras significativas, mais que cinco, as mesmas eram levadas para análise no Laboratório de Análises de Água no prédio SG-12 da Universidade de Brasília. Analisou-se em laboratório os parâmetros físicos e químicos apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros para análise e suas formas de determinação.

| Características | Parâmetro | Forma de determinação |
|-----------------|--|--|
| Físicas | Condutividade | Método eletrométrico com condutivímetro (Figura 4.19). |
| | Turbidez | Método Nefelométrico com turbidímetro. |
| | Temperatura | Medição pela sonda do condutivímetro. |
| | Sólidos Totais (ST) | Resíduo que resta em cápsula (cadinho) após a evaporação em banho-maria de uma porção de amostra e sua posterior secagem em estufa a 103-105°C até peso constante (Figura 4.19). |
| | Sólidos Suspensos Totais (SST) | Porção dos sólidos totais que fica retida em um filtro (membrana) que propicia a retenção de partículas de diâmetro maior ou igual a 1,2 µm (Figura 4.19). |
| | Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) | Relação entre ST e SS: SDT = ST - SST |
| Químicas | pH | Método eletrométrico com medidor de pH (Figura 4.19). |
| | Nitrogênio (nitrito, nitrato e amônia) | Utilização de espectrofotômetro (Figura 4.19) e outras análises de acordo com o livro <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> . |
| | Fósforo (total e reativo) | |
| | DQO | |

Fonte: Piveli, 2006; Costa, 2013.

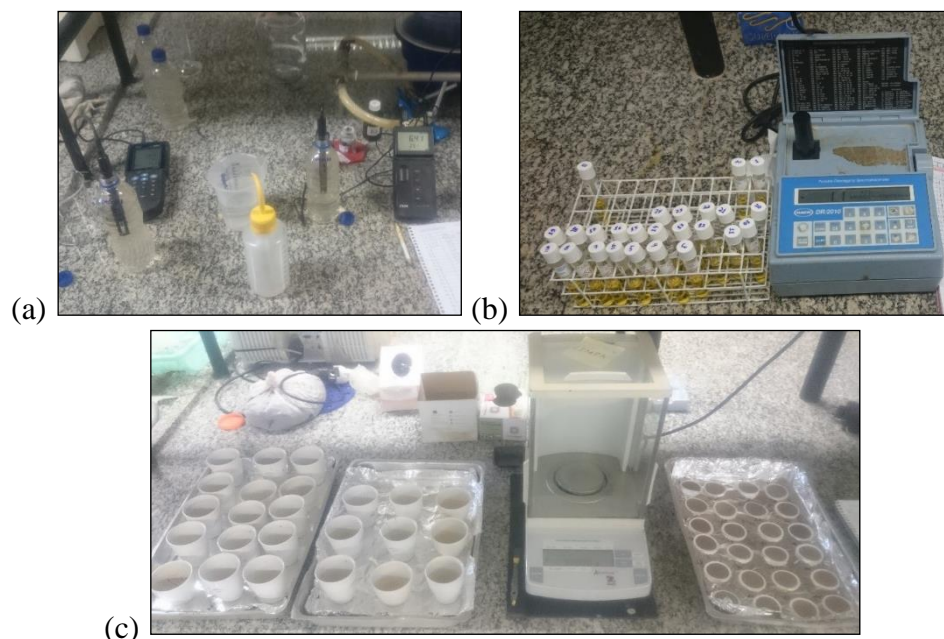


Figura 4.19 – a) Condutivímetro a esquerda e medidor de pH a direita; b) espectrofotômetro, medição de DQO; c) cápsulas (cadinhos) a esquerda e filtros (membranas) a direita para determinação de sólidos.

Foram coletadas e analisadas 493 amostras de água na lagoa de detenção, 259 da entrada e 234 da saída da lagoa, de 11 eventos em cada local. Na Tabela 4.2 a seguir pode-se observar a distribuição das amostras nos diferentes eventos na galeria (entrada da lagoa) e descarga de fundo da bacia (saída da lagoa).

Tabela 4.2 – Distribuição das amostras nos eventos observados.

| Entrada da lagoa de detenção | | | | Saída da lagoa de detenção | | | |
|------------------------------|--------|-------------------------|----------------|----------------------------|--------|-------------------------|----------------|
| Dia da coleta | Início | Intervalo de amostragem | Nº de amostras | Dia de início da coleta | Início | Intervalo de amostragem | Nº de amostras |
| 12/11/2018 | 20:00 | 10 min | 24 | 11/11/2018 | 06:35 | 10 min | 24 |
| 15/11/2018 | 21:43 | 10 min | 19 | 15/11/2018 | 09:39 | 1 h | 14 |
| 04/12/2018 | 14:26 | 5 min | 24 | 22/11/2018 | 09:30 | 1 h | 24 |
| 08/12/2018 | 13:06 | 10 min | 24 | 27/11/2018 | 09:30 | 1 h | 7 |
| 22/12/2018 | 16:23 | 10 min | 24 | 08/12/2018 | 17:17 | 30 min | 24 |
| 26/12/2018 | 21:39 | 10 min | 24 | 09/12/2018 | 10:08 | 1 h | 24 |
| 26/01/2019 | 13:23 | 5 min | 24 | 24/12/2018 | 14:39 | 1 h | 24 |
| 09/02/2019 | 16:09 | 5 min | 24 | 27/12/2018 | 10:00 | 1 h | 23 |
| 22/02/2019 | 19:20 | 5 min | 24 | 10/02/2019 | 14:38 | 1 h | 22 |
| 25/02/2019 | 07:42 | 5 min | 24 | 25/02/2019 | 09:29 | 1 h | 24 |
| 16/03/2019 | 20:53 | 5 min | 24 | 17/03/2019 | 00:37 | 1 h | 24 |

Observando a Tabela 5.1 dos eventos e suas amostras, definiu-se que os eventos dos dias 08/12/2018, 25/02/2019 e 16/03/2019 serão utilizados para posteriores análises e simulações. Essa definição se deu ao fato de que são eventos em que ocorrem coletas tanto na entrada quanto na saída da lagoa de detenção observando um tempo de concentração médio na lagoa de 4 horas, o que possibilita analisar e comparar o comportamento da lagoa

em relação à qualidade das águas drenadas de forma mais fidedigna. Apesar dos diversos parâmetros analisados em laboratório, o presente estudo se concentrará nos SST dado que os outros parâmetros serão objetos de outros estudos.

4.4 MODELAGEM

4.4.1 Simulação quantitativa

Para a modelagem quantitativa foram utilizados os dados de precipitação e vazão obtidos através do monitoramento quantitativo. Foram levantados e analisados os dados de 3 dos 11 eventos nos quais houve coleta de amostras pelo equipamento ISCO tanto na entrada quanto na saída da lagoa. Por meio das Equações 4.1 e 4.2 juntamente com dados coletados dos linígrafos pôde-se calcular as vazões na saída da galeria e na descarga de fundo.

A fim de proceder com a simulação foram definidas as áreas que os pluviômetros influenciam nas sub-bacias definidas no trabalho de Volken (2018), Figura 4.20. Para tal, utilizou-se o Método de Thiessen no qual determina-se a área de domínio de cada pluviômetro através de uma triangulação entre os pontos.

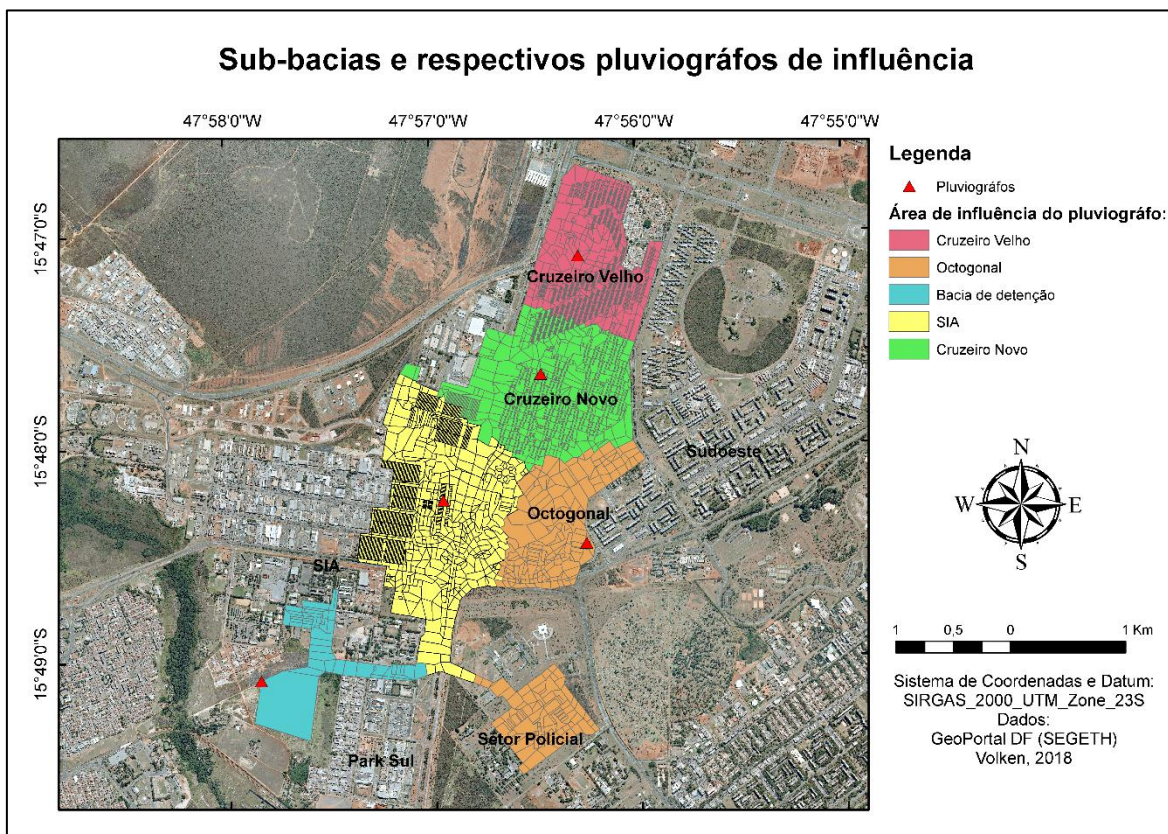


Figura 4.20 – Sub-bacias na área de domínio dos pluviômetros (Método de Thiessen).

Com os dados dos pluviógrafos para cada evento, o modelo foi executado a fim de observar o comportamento da simulação em relação aos dados observados. Para análise dos resultados da simulação e os dados observados, avaliou-se os valores de erros disponibilizados pelo programa PCSWMM apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Parâmetros estatísticos de erros do PCSWMM.

| PARÂMETROS ESTATÍSTICOS | NOME |
|-------------------------|---|
| ISE | Integral do erro quadrático |
| NSE | Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe |
| R ² | Coefficiente de determinação |
| SEE | Estimativa de erro padrão |
| RMSE | Raiz do erro quadrático |

Fonte: Costa, 2013.

O *Integral Square Error* (ISE), integral do erro quadrático, calcula o erro relativo acumulado e quanto menor esse valor, maior a aproximação do modelo em relação aos dados observados (Costa, 2013).

Há também o ISE *rating* que apresenta uma avaliação dos valores ISE, variando de acordo com os intervalos, sendo eles: excelente, < 3,0; muito bom, 3,0 – 6,0; bom, 6,0 – 10,0; razoável, 10,0 – 25,0; e ruim, > 25,0 (Tsuji, 2018).

O coeficiente de eficiência *Nash-Sutcliffe* (NSE) é muito utilizado na avaliação de modelos hidrológicos. Quanto mais próximo de 1, podendo variar de $-\infty$ a 1, melhor aproximação entre dados observados e simulados. Se os valores são menores que zero, o uso dos dados observados torna-se preferencial aos simulados (Tsuji, 2018).

O *Standard Error of Estimate* (SEE) indica o erro padrão da estimativa feita, medindo o erro médio dos dados. Quanto mais próximo de zero, melhor a representatividade do resultado (Costa, 2013).

Dentre os erros avaliados deu-se preferência ao coeficiente de determinação (R²) e ao NSE devido a sua importância e representatividade, além de serem resultados analisados e comparados em outros estudos como o de Costa (2013) e Tsuji (2018).

Analisando os resultados da simulação e comparando-os com os dados observados definiu-se qual o evento que serviria de base para calibração do modelo através da

ferramenta *Sensitivity-based Radio Tuning Calibration (SRTC)* na aba *Table* do PCSWMM. O SRTC pode ser usado para calibrar o modelo a partir de dados observados, além de testar a sensibilidade de parâmetros e atributos. O modelo foi calibrado por meio das análises dos resultados das simulações na entrada da lagoa devido à complexidade em entender o comportamento hidráulico na própria lagoa de detenção, o que influencia nos dados da saída da mesma. Antes de proceder com a calibração, foram arbitradas faixas de variação na aba *Table* para diferentes parâmetros de acordo com o proposto por Tsuji (2018), Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Faixas de variação dos parâmetros para calibração do modelo no PCSWMM.

| Parâmetros | Faixa de variação |
|--|--------------------------|
| Área das sub-bacias (<i>area</i>) | 5% |
| Largura das sub-bacias (<i>width</i>) | 50% |
| Armazenamento em depressões permeáveis (<i>Dstore perv</i>) | 50% |
| Rugosidade dos canais da rede de drenagem (<i>roughness</i>) | 20% |
| Curva número (CN) | 10% |

Fonte: Tsuji, 2018.

Após definição das faixas de variação e a calibração do evento com os melhores dados estatísticos de erros, utilizou-se essa calibração para verificar os outros eventos e o ajuste dos mesmos à calibração. Para tal utilizou-se a calibração como base e alterou-se os dados de precipitação e vazão observada na saída da galeria e na descarga de fundo. A partir da calibração base e verificação dos demais eventos, pode-se prosseguir para a simulação qualitativa do modelo.

4.4.2 Simulação qualitativa

Com o modelo, buscou-se simular a acumulação e a lavagem de SST na área de contribuição. Para simulação qualitativa foi criado um uso e ocupação do solo (*land use*) denominado “geral” a fim de representar a lavagem (*washoff*) e acúmulo (*buildup*) dos sólidos suspensos nas sub-bacias da área de contribuição. Essa definição de um uso e ocupação “geral” foi realizada de maneira a simplificar a simulação qualitativa de acúmulo de acordo com o adotado por Alvarez (2010) e também por Montenegro (2010), Costa (2013) e Tsuji (2018).

A acumulação de poluentes é dada quando a massa de poluentes é incrementada em períodos de seca. Ela pode ser representada com relação matemática exponencial, potencial ou uma função de saturação. O volume acumulado calculado pode ser relacionado com a área total das sub-bacias ou ao comprimento do meio-fio das ruas, tendo como variável

independente o período antecedente seco (Beling, 2013). A equação utilizada para o acúmulo na simulação do uso de ocupação definido foi a exponencial (EXP) com coeficiente de acúmulo máximo igual a 0,99 e taxa constante igual a 0,0206.

A fim de simular as cargas de SST no modelo, utilizou-se as equações das curvas-chave obtidas por meio das análises dos resultados laboratoriais. As equações foram elaboradas a partir dos dados de todas as amostras analisadas no monitoramento qualitativo que não apresentaram erros ou incongruências nos resultados. Foram identificados os potenciais erros de leitura e processamento de dados, como vazões baixas que apresentavam uma concentração muito elevada em relação a média observada para essa vazão e vice-versa. Assim foram utilizadas 229 amostras de eventos da galeria na entrada da lagoa e 191 amostras de eventos da saída da lagoa para a construção das curvas.

Com as equações das curvas-chave de SST inseriu-se os coeficientes obtidos em *washoff* no uso e ocupação de solo criado no PCSWMM para verificar as cargas de SST geradas pela bacia de drenagem. A equação de lavagem utilizada no programa é a curva de taxa de lixiviação (RC) onde insere-se o coeficiente e o expoente da curva-chave dos dados observados.

Com a definição das equações de *buildup* e *washoff* no programa, atribuiu-se o uso do solo “geral” como 100% da área à todas as sub-bacias a fim de simular qualitativamente o modelo e observar sua representatividade em relação aos dados observados. Após a simulação o programa apresenta os mesmos dados estatísticos de erros da simulação quantitativa para análise dos resultados e avaliação do comportamento da simulação em relação aos dados observados empiricamente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresenta-se os resultados e a discussão dos dados obtidos através do monitoramento quali-quantitativo e das simulações quantitativas e qualitativas realizadas com auxílio do programa PCSWMM. Busca-se analisar o comportamento da lagoa de retenção em relação aos sólidos suspensos e o comportamento do modelo em relação aos dados observados.

5.1 MONITORAMENTO QUALI-QUANTITATIVO

Com os dados obtidos de vazão e concentração de sólidos suspensos construiu-se as curvas-chave de SST para a entrada (galeria) e saída (descarga de fundo) da lagoa de retenção mostradas nas Figuras 5.1 e 5.2.

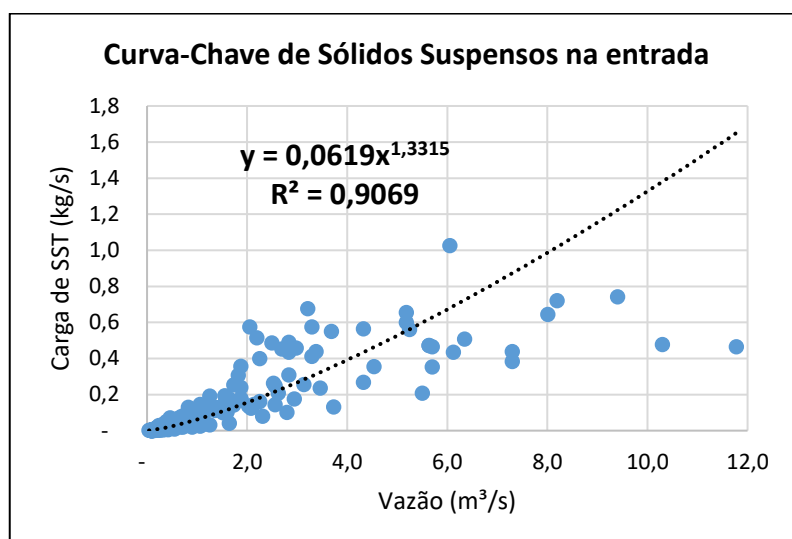


Figura 5.1 – Curva-chave de SST na entrada da lagoa de retenção.

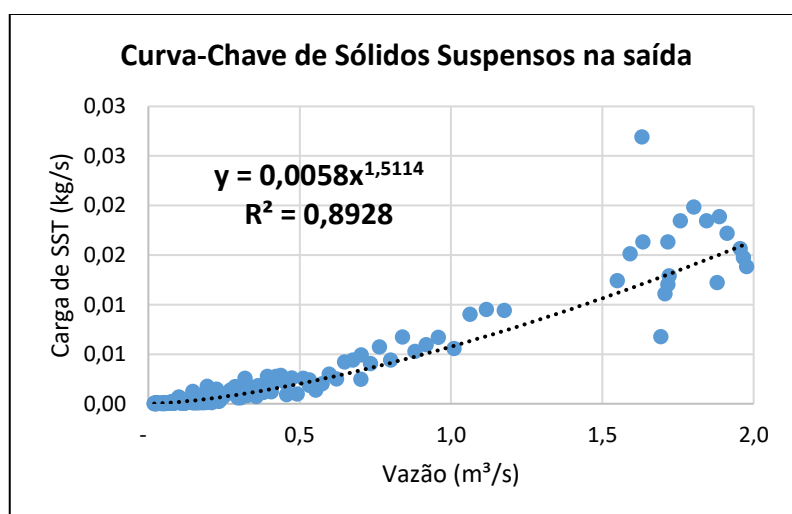


Figura 5.2 – Curva-chave de SST na saída da lagoa de estabilização.

As curvas-chave de SST levantadas para a entrada e saída da lagoa de detenção apresentaram um razoável ajuste da linha de tendência, regida por uma equação potencial. A equação gerada para a entrada necessita de mais dados empíricos com vazões maiores que 4 m³/s para uma melhor extrapolação da linha de tendência. Os valores de R² ficaram em torno 0,9 que apresenta um ajuste razoável da curva em relação aos pontos.

Através dos monitoramentos quantitativo e qualitativo realizados e o tratamento dos dados obtidos foi possível construir os polutogramas de sólidos na entrada e na saída da lagoa de detenção para os eventos de objeto deste estudo. Os valores das concentrações de cada parâmetro e a respectiva vazão observada no momento da coleta da amostra podem ajudar na avaliação do comportamento das cargas na lagoa de detenção. O parâmetro utilizado nas análises de resultados é o de SST. A Tabela 5.1 mostra os valores máximos, mínimos e as médias das vazões, além das concentrações de SST observadas nos 3 eventos objetivo para fins de estimativa da remoção de SST pela lagoa de detenção.

Tabela 5.1 – Valores máximos, mínimos, médias e desvios padrões das vazões e concentrações de SST observados nos eventos.

| Dados | Evento 1 (08/12/2018) | | | | Evento 2 (25/02/2019) | | | | Evento 3 (16/03/2019) | | | |
|----------------------|---------------------------|-----------|---------------------------|-----------|---------------------------|-----------|---------------------------|-----------|---------------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| | Entrada da lagoa | | Saída da lagoa | | Entrada da lagoa | | Saída da lagoa | | Entrada da lagoa | | Saída da lagoa | |
| | Vazão (m ³ /s) | SS (mg/l) | Vazão (m ³ /s) | SS (mg/l) | Vazão (m ³ /s) | SS (mg/l) | Vazão (m ³ /s) | SS (mg/l) | Vazão (m ³ /s) | SS (mg/l) | Vazão (m ³ /s) | SS (mg/l) |
| Máximo | 6,124 | 149,5 | 1,977 | 16,5 | 8,197 | 107,0 | 0,112 | 6,7 | 6,052 | 169,5 | 0,084 | 12,4 |
| Mínimo | 0,089 | 8,5 | 0,226 | 3,5 | 0,171 | 26,5 | 0,068 | 0,0 | 0,522 | 33,0 | 0,044 | 0,5 |
| Média | 2,165 | 46,6 | 1,647 | 8,4 | 2,042 | 58,0 | 0,092 | 2,6 | 2,082 | 87,9 | 0,065 | 1,9 |
| Desvio Padrão | 2,416 | 41,6 | 0,430 | 2,8 | 2,524 | 23,6 | 0,014 | 1,8 | 1,414 | 36,2 | 0,013 | 2,3 |

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram os polutogramas da entrada e saída da lagoa para o evento do dia 08/12/2018, respectivamente. O pico de SST de 149,5 mg/l observado ocorre antes do pico de vazão observado na entrada (6,12 m³/s) e vai diminuindo à medida que a vazão reduz ao longo do evento. Na saída da lagoa observa-se uma variação menor das concentrações de SST, com desvio padrão de 2,8 mg/l, em relação a variação das vazões. Considerando as médias das concentrações de SST e das vazões observadas no evento fez-se uma estimativa do fluxo de massa gerado através da Equação 3.1, obtendo para a entrada uma massa de SST de 8,707 ton/dia e na saída da lagoa 1,262 ton/dia, o que representa uma remoção de 85,51% da massa afluyente de SST pela lagoa de detenção.

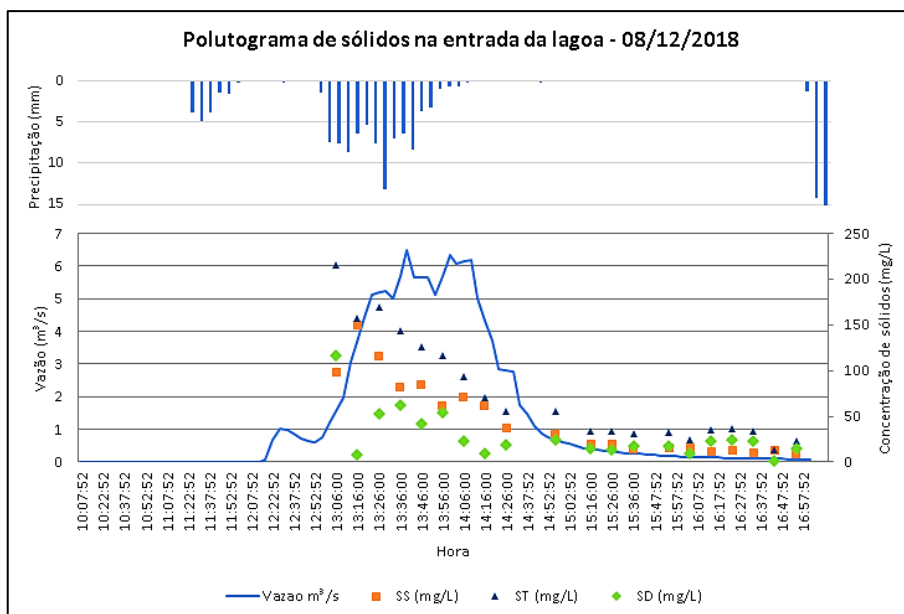


Figura 5.3 – Polutograma de sólidos na entrada da lagoa para o evento do dia 08/12/2018.

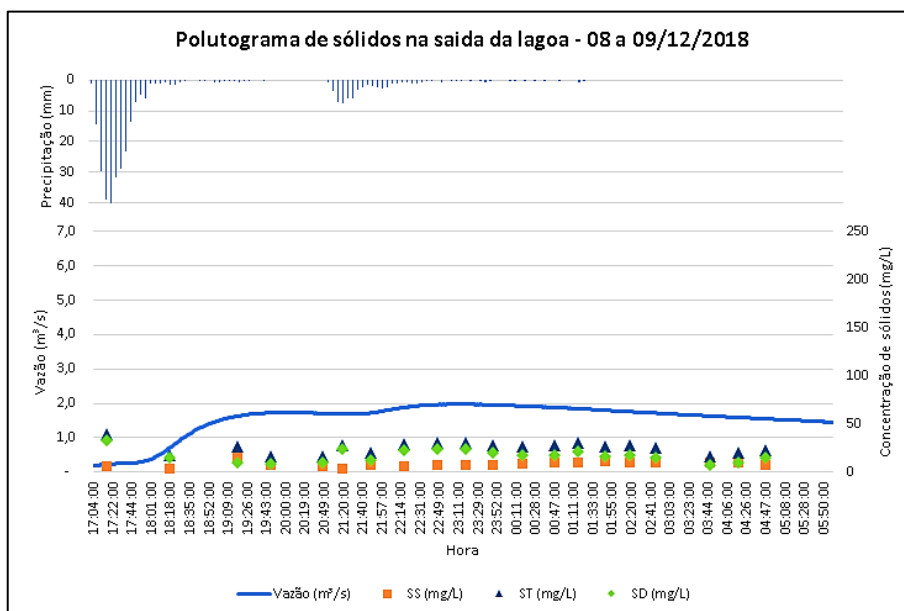


Figura 5.4 – Polutograma de sólidos na saída da lagoa para o evento do dia 08/12/2018.

As Figuras 5.5 e 5.6 mostram os polutogramas da entrada e saída da lagoa para o evento do dia 25/02/2019, respectivamente. O pico de SST de 107,0 mg/l observado ocorre antes do pico de vazão observado na entrada (8,197 m³/s) e vai diminuindo à medida que a vazão reduz ao longo do evento. Na saída da lagoa observa-se pouca variação das concentrações de SST, com desvio padrão de 1,8 mg/l, em relação a variação das vazões. Considerando as médias das concentrações de SST e das vazões observadas no evento fez-se uma estimativa do fluxo de massa gerado, obtendo para a entrada uma massa de SST de

10,242 ton/dia e na saída da lagoa 0,021 ton/dia, o que representa uma remoção de 99,80% da massa afluyente de SST pela lagoa de detenção.

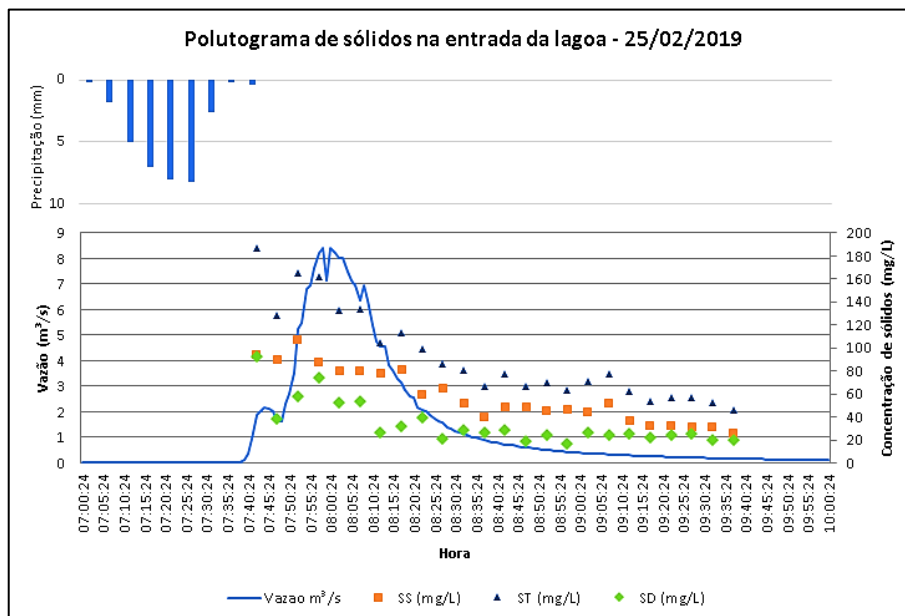


Figura 5.5 – Polutograma de sólidos na entrada da lagoa para o evento do dia 25/02/2019.

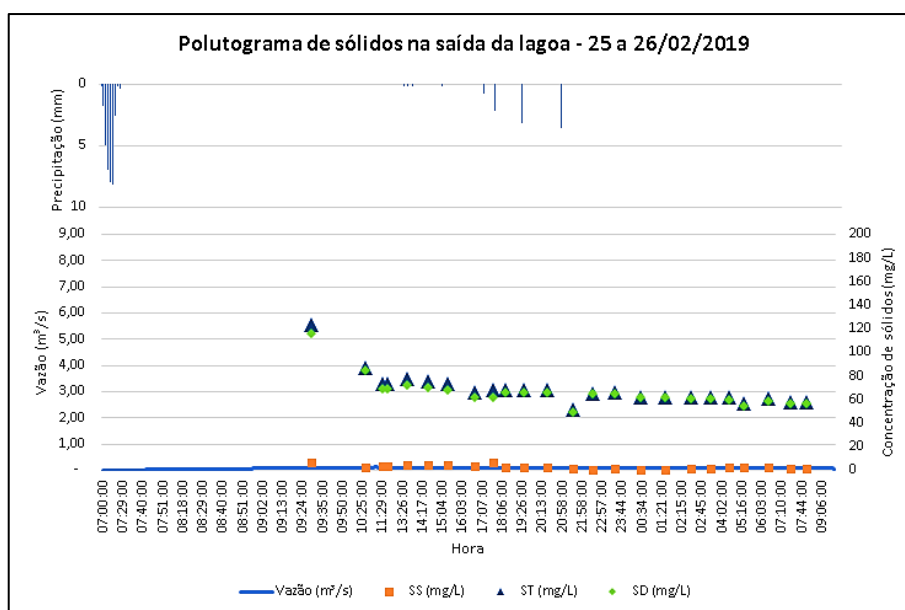


Figura 5.6 – Polutograma de sólidos na saída da lagoa para o evento do dia 25/02/2019.

As Figuras 5.7 e 5.8 mostram os polutogramas da entrada e saída da lagoa para o evento do dia 16/03/2019, respectivamente. O pico de SST de 169,5 mg/l observado ocorre próximo do pico de vazão observado na entrada (6,052 m³/s) e vai diminuindo à medida que a vazão reduz ao longo do evento. Na saída da lagoa observa-se pouca variação das concentrações de SST, com desvio padrão de 2,3 mg/l, em relação a variação das vazões. Considerando as médias das concentrações de SST e das vazões observadas no evento fez-

se uma estimativa do fluxo de massa gerado, obtendo para a entrada da lagoa uma massa de SST de 15,817 ton/dia e na saída da lagoa 0,011 ton/dia, o que representa uma remoção de 99,93% da massa afluyente de SST pela lagoa de detenção.

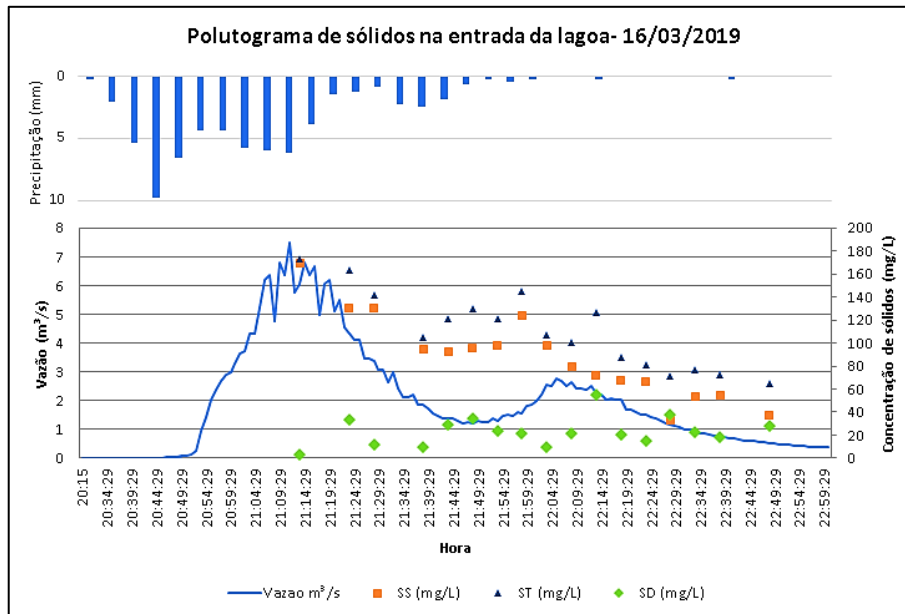


Figura 5.7 – Polutograma de sólidos na entrada da lagoa para o evento do dia 16/03/2019.

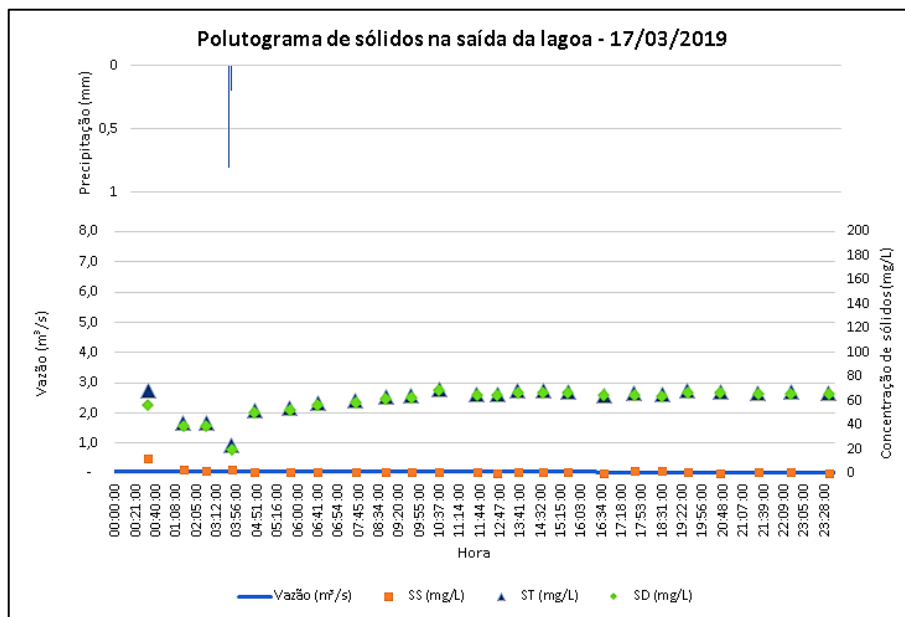


Figura 5.8 – Polutograma de sólidos na saída da lagoa para o evento do dia 16/03/2019.

Observa-se que há uma remoção maior de massa de SST nos eventos 2 e 3 com mais de 99%, enquanto que o evento 1 apresenta uma remoção de 85,51%. Fazendo uma média entre os 3 eventos tem-se uma remoção das massas de SST pela lagoa de detenção de 95,08%, bastante elevado quando comparado a média de 63% observada por Pezzaniti *et al.*

(2012) e 40% observada por Birch *et al.* (2006). Essa menor remoção de 85,51% pode ser devido ao fato de que no primeiro evento há ocorrência de diversos eventos chuvosos seguidos, enquanto os outros possuem apenas uma precipitação característica. Esses diversos eventos de chuva fizeram com que a vazão média na saída da lagoa fosse maior, influenciando no processo de sedimentação e diminuindo o amortecimento das cargas pela lagoa de detenção no primeiro evento. A Figura 5.9 apresenta resumidamente os resultados dos fluxos de massa de SST e a remoção da lagoa de detenção para cada evento.

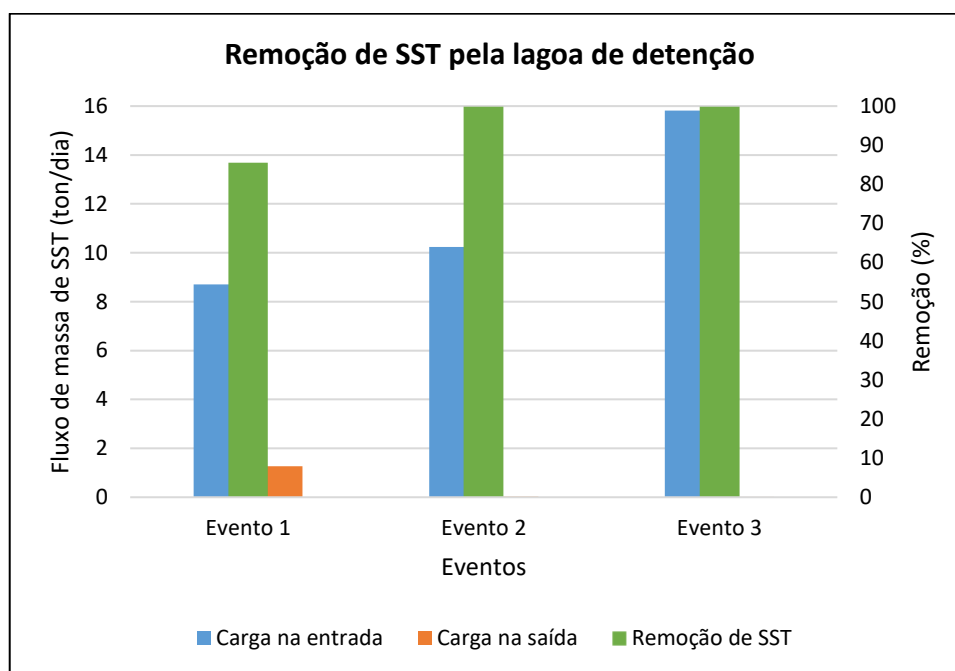


Figura 5.9 – Fluxo de massa de SST e porcentagem de remoção pela lagoa de detenção.

Os dados observados nos 3 eventos evidenciam que a lagoa de detenção possui um certo grau de remoção considerável. Isso pode ser devido ao seu superdimensionamento uma vez que a lagoa possui volume grande para amortecimento de cheias e cargas de sedimentos; e como observado nas diversas visitas há um grande acúmulo de sedimentos na mesma, assim como mostrado na Figura 4.6.

5.2 MODELAGEM

5.2.1 Simulação quantitativa

Com os dados do monitoramento, destacou-se os dados observados na Figura 5.10 que mostra a vazão afluente na entrada da lagoa (Q_{bacia}) e a vazão efluente na saída da lagoa ($Q_{\text{saída}}$), além das precipitações registradas nos diferentes pluviômetros da área de contribuição para os eventos desejados.

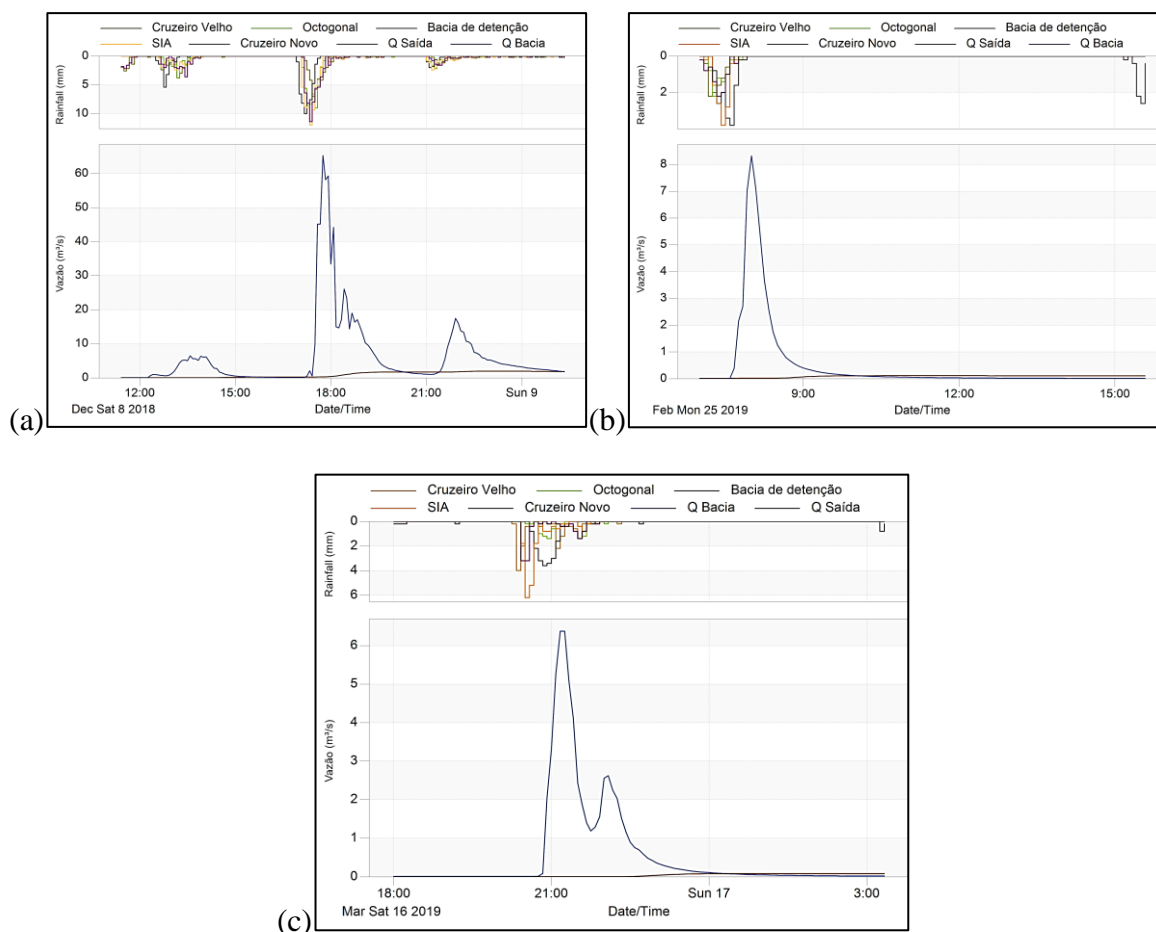


Figura 5.10 – Vazões e precipitações observadas nos diferentes eventos. a) Evento 1, 08/12/2018; b) evento 2, 25/02/2019; c) evento 3, 16/03/2019.

Observa-se na Figura 5.10 que ocorreram diversas precipitações no primeiro evento, totalizando uma vazão afluyente elevada à lagoa de detenção. As amostras e análises qualitativas não representam de forma paralela os dados quantitativos do dia 08/12/2018 uma vez que os amostradores somente coletam 24 amostras.

Com os resultados das simulações pôde-se observar o comportamento do modelo em relação aos dados empíricos do monitoramento quantitativo e qualitativo. As simulações dos 3 eventos retornaram os valores de erros mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Parâmetros estatísticos de erros das simulações dos eventos sem calibração.

| Função de erro | Evento 1 | Evento 2 | Evento 3 |
|--|----------|----------|----------|
| <i>Integral square error rating</i> | Fair | Poor | Poor |
| <i>Integral square error (ISE)</i> | 13.9 | 33.6 | 36.2 |
| <i>Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)</i> | -0.0333 | -0.371 | -1.92 |
| <i>Coefficient of determination (R²)</i> | 0.931 | 0.786 | 0.814 |
| <i>Standard error of estimate (SEE)</i> | 10.8 | 1.68 | 2.14 |
| <i>Root mean square error (RMSE)</i> | 78.2 | 7.07 | 11.5 |
| <i>Root mean square error dimensionless (RMSE dim)</i> | 0.155 | 1.61 | 1.46 |

Como pode-se observar na Tabela 5.2, o evento com melhor ajuste em relação aos dados observados foi o primeiro, 08/12/2018, no qual apresenta o melhor NSE e R^2 . Através da Figura 5.11 pode-se observar graficamente o comportamento das simulações em comparação com os dados empíricos. O evento 3 foi o que apresentou piores resultados numéricos de ajuste dos dados.

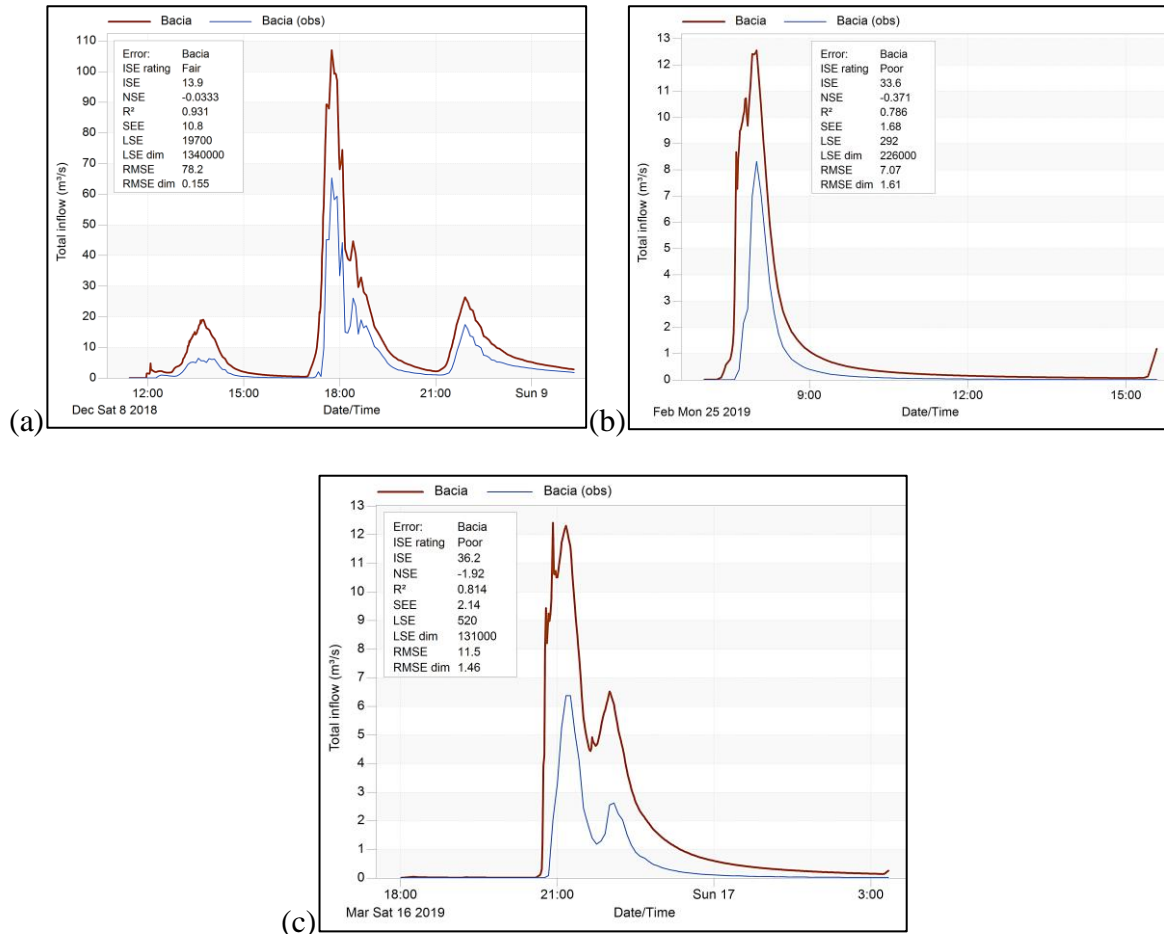


Figura 5.11 – Resultados das simulações quantitativas dos eventos sem calibração. a) Evento 1, 08/12/2018; b) evento 2, 25/02/2019; c) evento 3, 16/03/2019.

Dado que os resultados da simulação do evento 1 apresentaram o melhor ajuste em relação aos dados observados, sua calibração serviu de base para as simulações com os outros eventos. Para tal, foram arbitradas faixas de variação em relação ao modelo, de acordo com a Tabela 5.3, que após calibração retornou alterações desses parâmetros com auxílio da ferramenta *SRTC*, Figura 5.12. As mudanças realizadas nos parâmetros estão presentes na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Faixas de variação dos parâmetros para calibração do modelo no PCSWMM.

| Parâmetros | Faixa de variação | Máxima alteração |
|--|-------------------|------------------|
| Largura das sub-bacias (<i>width</i>) | 50% | 33,4% |
| Armazenamento em depressões permeáveis (<i>Dstore perv</i>) | 50% | 0% |
| Rugosidade dos canais da rede de drenagem (<i>roughness</i>) | 20% | - 20% |
| Curva número (CN) | 10% | 9,1% |

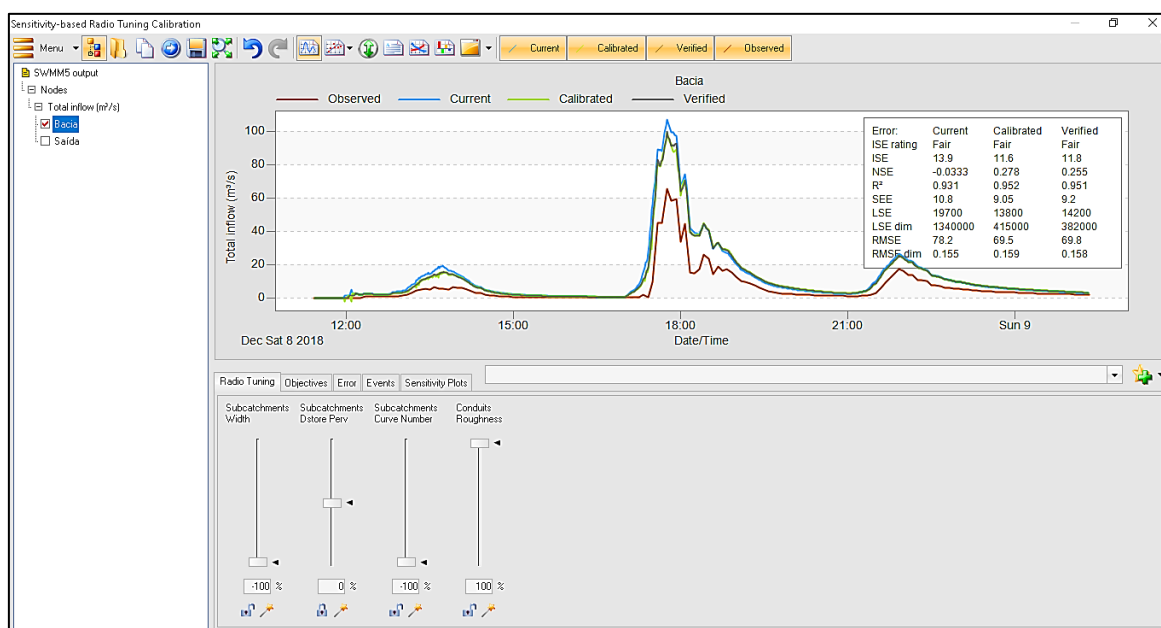


Figura 5.12 – Calibração e verificação do evento 1 no SRTC.

A Figura 5.12 mostra o resultado das vazões após calibração. Posteriormente fez-se a simulação dos eventos 2 e 3 utilizando os parâmetros calibrados para o evento 1. Com as verificações dos eventos tem-se novos dados estatísticos de erros (Tabela 5.4) para uma nova avaliação do comportamento do modelo em relação aos dados observados. Na Figura 5.13 observa-se os resultados da simulação dos eventos 2 e 3. Apesar das simulações apresentarem resultados nos quais superestimam os dados, os valores simulados acompanham o comportamento dos dados observados. Observa-se que os picos e vales de vazões da simulação estão temporalmente próximos dos valores do monitoramento quantitativo, demonstrando que a curva-chave elaborada por De Paula (2018) apresenta uma boa representatividade.

Tabela 5.4 – Parâmetros estatísticos de erros das simulações dos eventos sem calibração e verificados.

| Função de erro | Simulação sem calibração | | | Simulação verificada | | |
|----------------------|--------------------------|----------|----------|----------------------|----------|----------|
| | Evento 1 | Evento 2 | Evento 3 | Evento 1 * | Evento 2 | Evento 3 |
| ISE rating | Fair | Poor | Poor | Fair | Poor | Poor |
| ISE | 13.9 | 33.6 | 36.2 | 11.8 | 26.7 | 28.6 |
| NSE | -0.0333 | -0.371 | -1.92 | 0.255 | 0.138 | -0.819 |
| R² | 0.931 | 0.786 | 0.814 | 0.951 | 0.865 | 0.863 |
| SEE | 10.8 | 1.68 | 2.14 | 9.2 | 1.33 | 1.69 |
| LSE | 19700 | 292 | 520 | 14200 | 184 | 324 |
| LSE | 1340000 | 226000 | 131000 | 382000 | 70100 | 29100 |
| RMSE | 78.2 | 7.07 | 11.5 | 69.8 | 5.7 | 9.05 |
| RMSE dim | 0.155 | 1.61 | 1.46 | 0.158 | 1.77 | 1.55 |

* Evento 1 – calibrado.

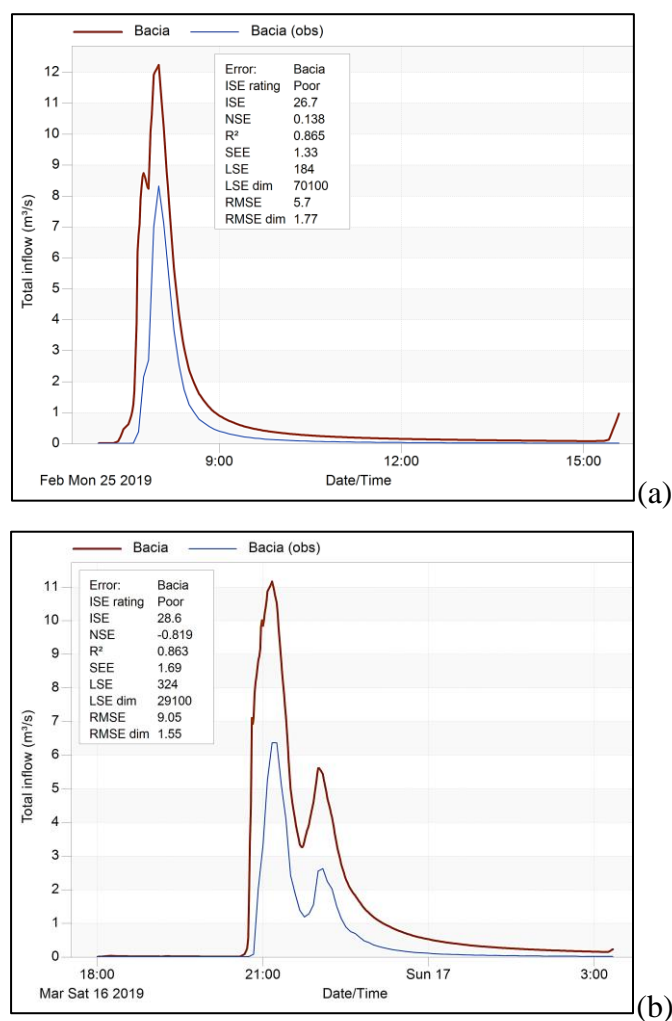


Figura 5.13 – Resultados das verificações dos eventos 2 (a) e 3 (b).

Através dos gráficos e dos dados estatísticos de erros observa-se que há uma melhora no ajuste dos resultados das simulações em relação aos dados observados. Com a realização da calibração e verificação prosseguiu-se para as simulações de qualidade da água.

5.2.2 Simulação qualitativa

Após a calibração e verificação, o programa foi executado para simulação da carga de sedimentos suspensos. A Figura 5.14 a seguir mostra os resultados das simulações das cargas de SST (kg/s) em comparação com os dados observados no evento 1. Observa-se que os valores simulados de SST não acompanham as variações dos dados observados tanto em vazões altas como em baixas. A simulação desse evento se mostra insatisfatória com NSE negativo (-1,32) e R^2 baixo (0,817).

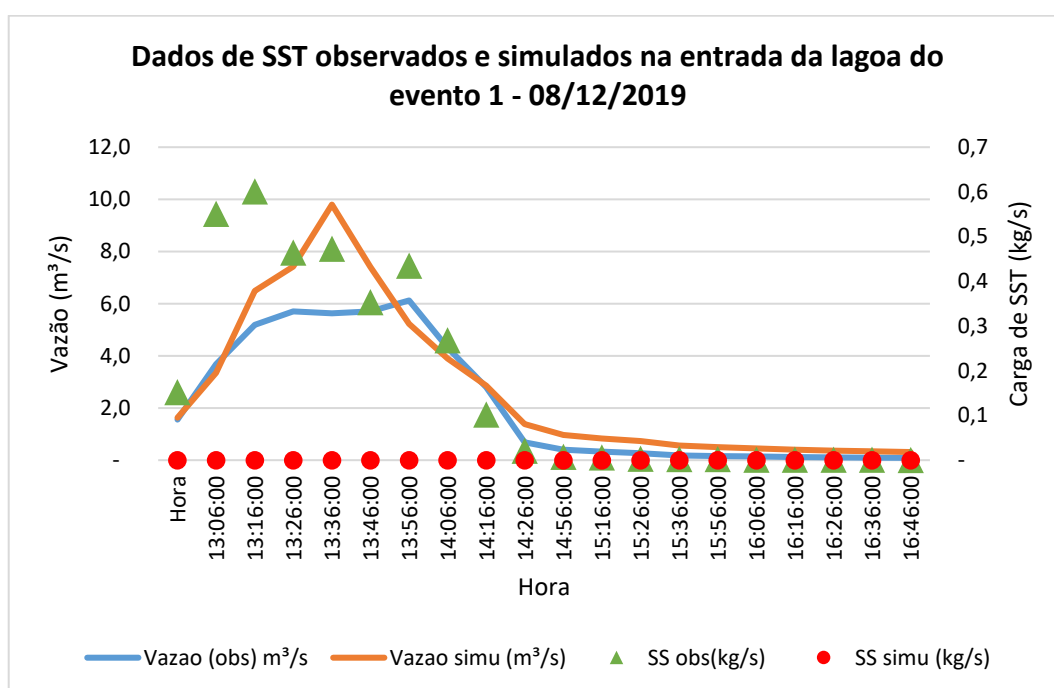


Figura 5.14 – Dados de SST simulados e observados do evento 1 (08/12/2018) na entrada da lagoa de retenção.

Na Figura 5.15, apresenta-se os dados simulados e observados na entrada do evento 2 que seguem a mesma lógica do primeiro evento. Observa-se que os valores simulados de SST não acompanham as variações dos dados observados tanto em vazões altas como em baixas. A simulação se mostra insatisfatória com NSE negativo (-6,29) e R^2 muito baixo (0,471).

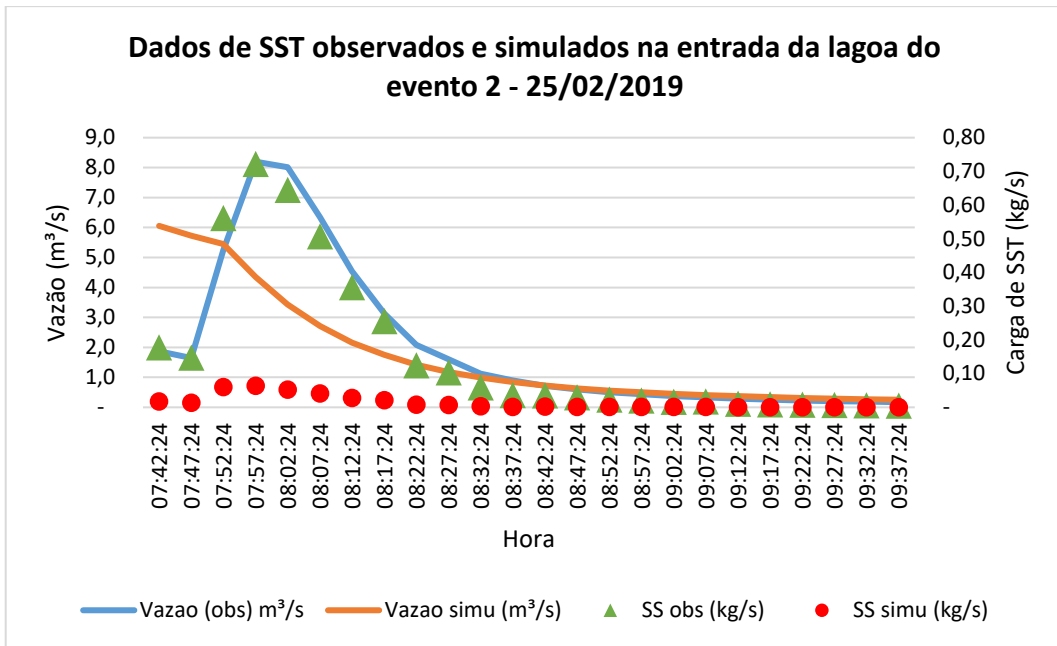


Figura 5.15 – Dados de SST simulados e observados do evento 2 (25/02/2019) na entrada da lagoa de detenção.

Na Figura 5.16, observa-se que o evento 3 é aquele que melhor apresenta valores simulados de SST acompanhando as variações dos dados observados tanto em vazões altas como em baixas, mas em um grau muito baixo de confiabilidade. A simulação para o terceiro evento também se mostra insatisfatória com NSE negativo (-6,28) e R² muito baixo (0,694).

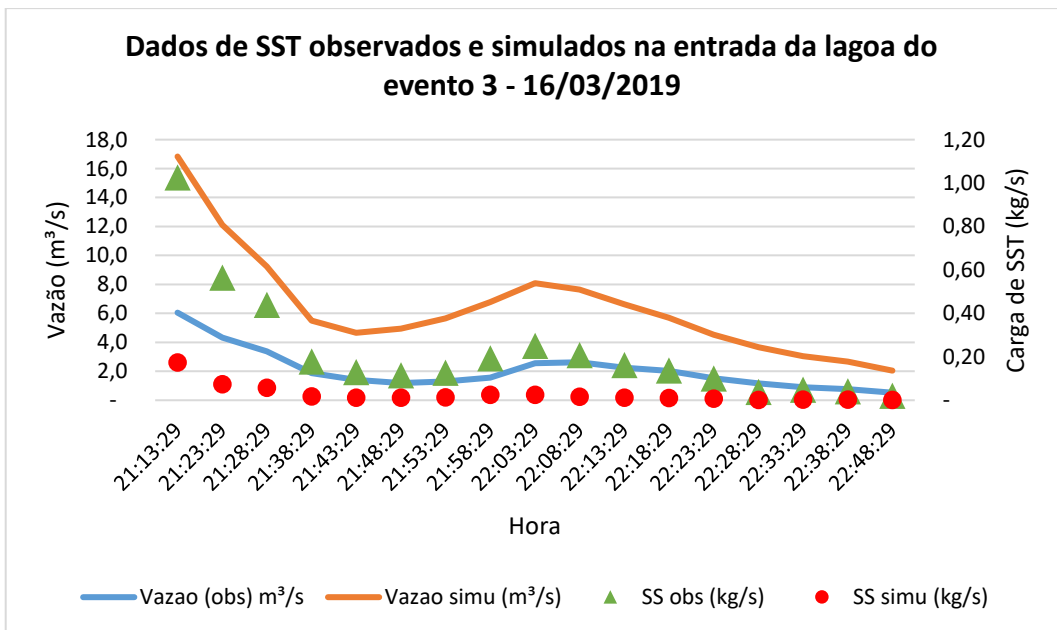


Figura 5.16 – Dados de SST simulados e observados do evento 1 (16/03/2018) na entrada da lagoa

Os resultados das simulações das cargas de SST se mostraram muito distantes dos valores obtidos através dos monitoramentos. A simulação do evento 3 (Figura 5.12) foi a que apresentou melhores resultados em que o comportamento das cargas simuladas acompanha o comportamento das cargas e vazões observadas, porém há um distanciamento significativo entre os valores.

Os resultados das simulações estarem insatisfatórios se dá ao fato da não calibração do modelo e à simplificação adotada quanto ao uso e ocupação de solo “geral”. Para uma representatividade mais fidedigna dos aspectos de qualidade das sub-bacias da área de contribuição da rede de drenagem, deve-se definir os diversos usos e ocupações de solo, além das proporções de cada um na sub-bacia. Após determinado quais os usos e suas proporções na sub-bacia, deve-se atribuir as suas respectivas equações de acúmulo colocando os coeficientes de acordo com os usos, demandando uma análise mais aprofundada da área de estudo. Mesmo com essas atribuições, deve-se variar os coeficientes das equações de acúmulo a fim de calibrar o modelo e buscar sua melhor representatividade da realidade quando comparado com os dados observados.

6 CONCLUSÕES

O presente estudo possibilitou observar os diversos passos para obtenção de dados em campo por meio do monitoramento quantitativo e qualitativo, desde a instalação de equipamentos até o processamento dos dados e modelagem matemática. Vivenciou-se as adversidades das atividades de campo e laboratório para levantamento dos dados necessários aos diversos estudos de recursos hídricos como precipitação, cotas de nível d'água na entrada e saída da lagoa de detenção, velocidade de escoamento, além de coleta e análise de parâmetros físico-químicos em laboratório das amostras.

A lagoa de detenção apresentou uma remoção de SST significativamente alta nos 3 eventos, ultrapassando os 85%. Isso implica numa baixa carga de sedimentos carregada para o córrego Guará. Essa remoção é auxiliada por grande volume uma vez que a lagoa de detenção foi superdimensionada. O fato da lagoa ser superdimensionada possibilita que outras redes de drenagem futuras sejam incorporadas ao sistema para um melhor aproveitamento da mesma.

As simulações quantitativas apresentaram bons resultados dado que a vazão gerada pelo modelo se aproxima dos dados observados nos eventos estudados. Já as simulações qualitativas não foram satisfatórias, gerando cargas muito inferiores às observadas. Os resultados insatisfatórios das simulações qualitativas se deram principalmente devido às incertezas nos coeficientes do modelo que demandam melhor estudo sobre o assunto.

Para entender de forma mais aprofundada o comportamento da lagoa de detenção em relação às cargas de sedimentos pode-se utilizar um estudo das curvas de nível do local. Com as curvas pode-se utilizar o PCSWMM para simular a sedimentação na lagoa ao longo de sua operação e observar as cargas geradas, além dos pontos onde possivelmente ocorre maior acúmulo de SST.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADASA – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. (2018). Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal. Brasília: ADASA.
- ALVAREZ, R.P.P. (2010). *Estudo Experimental e Teórico da qualidade de água de drenagem urbana com base ecohidrológica*. Dissertação de Mestrado EESC. São Carlos, SP. 239p.
- ArKIS Infraestrutura Urbana Ltda. (2005). Projeto de avaliação ambiental e estudo de dissipação dos pontos de lançamentos da galeria do Cruzeiro – Guará – Distrito Federal. Brasília, DF, 56 p.
- BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. (2011). *Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*. 2.ed. ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 318 p.
- BELING, F. A. (2013). *Análise do desempenho do modelo SWWM5 acoplado ao calibrador PEST na bacia do Arroio Canela – RS*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, RS.
- BIRCH, G.F.; MATTHAI, C.; FAZELI, M.S. (2006). *Efficiency of a retention/detention basin to remove contaminants from urban stormwater*, *Urban Water Journal*, 3:2, 69-77.
- BRASIL. Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA nº 357 (2005). Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu Enquadramento. Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, p. 58-63.
- BRASÍLIA. Resolução da Adasa nº 009 (2011). Estabelece os procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga de lançamento de águas pluviais em corpos hídricos de domínio do Distrito Federal e naqueles delegados pela União e Estados.
- BRASÍLIA. Resolução do Conselho de Recursos Hídricos do Distrito Federal – CRH/DF nº 02 (2014). Aprova o enquadramento dos corpos de água superficiais do Distrito Federal em classes, segundo os usos preponderantes, e dá encaminhamentos.
- BUTLER, D.; DAVIES, J. (2011). *Urban drainage*. 3.ed. London: CRC Press, 625 p.

- CANHOLI, A. P. (2005). *Drenagem urbana e controle de enchentes*. 1ª ed. Oficina de Textos, São Paulo, 302 p.
- CARVALHO, N. O. (2008). *Hidrossedimentologia prática*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência.
- COSTA, M. E. L. (2013). *Monitoramento e modelagem de águas de drenagem urbana na bacia do Lago Paranoá*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 179 p.
- DE PAULA; A. C. V. (2018). *Comportamento e evolução temporal de bacias de retenção e retenção no amortecimento de cheias e na qualidade da água – estudo de caso da bacia de retenção do Guará II – DF*. Primeiro Seminário de Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
- FERRANTE, J.E.T.; RANCAN, L.; NETTO, P.B. (2001). *Meio Físico In: Fonseca, F. O. Olhares sobre o Lago Paranoá, Brasília – DF: Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, SEMARH 2001, 1ª edição.*
- FERREIRA, L. C. A. (2008). *Variação da qualidade da água do escoamento superficial de duas bacias de drenagem de Natal/RN*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 119 p.
- FREITAS, F.R.S. (2013). *Avaliação progressiva da qualidade da água do escoamento superficial de uma bacia fechada de drenagem urbana*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 53 p.
- GOMES, C.I.D. (2015). *Avaliação da qualidade de águas pluviais lançadas por bacias de retenção em corpos hídricos do Distrito Federal, DF – BRASIL. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.*
- GRIBBIN, J. E. (2009). *Introdução à Hidráulica, Hidrologia e Gestão de Águas Pluviais*. São Paulo: Cengage Learning, 3ª Ed., 494 p.

- HUBER, W. C.; ROSSMAN, L. A.; DICKINSON, R. E. (2005). *EPA Storm Water Management Model, SWMM5*. In: Singh, V. P.; Frevert, D. K. (Org.) *Watershed Models*. CRC Press, Boca Raton, EUA, 339-359.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. (2018). Normais Climatológicas do Brasil. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 9 nov. 2018.
- MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION AND OFFICE OF COASTAL ZONE MANAGEMENT (1997). *Stormwater Management, Volume Two: Stormwater Technical Handbook*. Massachusetts, E.U.A., 183 p.
- MERTEN, G. H.; HOROWITZ, A. J.; MINELLA, J. P.G. 3; CLARKE, R. T.; RIBEIRO, G. S. (2007). *Estimativa do fluxo de sedimentos em suspensão utilizando a curva-chave aplicada a vazões mensais e diárias. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH. São Paulo.
- MONTENEGRO, I.R. (2011). *Análise de Sistemas de Drenagem Urbana no Plano Piloto*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118 p.
- PAZ, M.F; GASTALDINI, M.C.C; JORGE, M.P. (2004). *Avaliação da qualidade do escoamento superficial da Bacia Alto da Colina*. In: *Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 11, ABES. Natal, Rio Grande do Norte.
- PEHOVAZ, R. (2010). *Estudo experimental e teórico da qualidade de água da drenagem urbana com base ec hidrológica*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 215 p.
- PEZZANITI, D., BEECHAM, S., & KANDASAMY, J. (2012). *Stormwater detention basin for improving road-runoff quality. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 165 (9), 461–471.
- PIVELI, R.P.; KATO, M.T. (2006). *Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos*. 1.ed. São Paulo: ABES.
- REATTO, A.; MARTINS, E. de S.; FARIAS, M. F. R.; SILVA, A. V. DA; CARVALHO JÚNIOR, O. A. de (2004). *Mapa pedológico digital: SIG atualizado do Distrito*

- Federal escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo.* Planaltina, DF: Embrapa Cerrados. 31 p.
- RIGHETTO, A. M. (2009). *Manejo De Águas Pluviais Urbanas.* Projeto PROSAB, Editora ABES, Rio de Janeiro, 396 p.
- RIGHETTO, A. M.; GOMES, K. M.; FREITAS, F. R. S. (2017). *Poluição difusa nas águas pluviais de uma bacia de drenagem urbana.* In: *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 22(6), 1109-1120.
- ROSSMAN, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1.* U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 352 p.
- ROSSMAN, L. A., (2016). *Storm Water Management Model Reference Manual. Volume I – Hydrology (Revised).* Office of Research and Development Water Supply and Water Resources Division. New York. US EPA. 233 p.
- SALGADO, A.A. (2013). *Caracterização da influência de cargas poluidoras difusas na qualidade da água no córrego Botafogo, Goiânia, Goiás.* Dissertação de Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 127 p.
- SILVA, F. T. A. DA; LIMA, L. D. de. (2016). *O Impacto de Novos Loteamentos Urbanos no escoamento Superficial – Setor Habitacional Noroeste - Distrito Federal.* Monografia de Projeto Final em Engenharia Ambiental - Universidade de Brasília, 101 p.
- SOUZA, F. P. (2014). *Monitoramento e modelagem hidrológica da sub-bacia do lago Paranoá – Brasília/DF – e avaliação de bacia de retenção.* Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139 p.
- TOMINAGA, E. N. S. (2013). *Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte.* Dissertação de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 137 p.
- TSUJI, T. M. (2018). *Monitoramento e modelagem das águas de drenagem pluvial no núcleo urbano da bacia do ribeirão Riacho Fundo, Brasília – DF.* 2018. 150 f., il.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília.

TUCCI, C. E. M. (2005). *Gestão de Águas Pluviais Urbanas*. Ministério das Cidades. Programa de Modernização do Setor de Saneamento.

TUCCI, C.E.M (2001). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS - ABRH. 2.ed., 943 p.

VOLKEN, N. J. (2018). *Avaliação hidráulica e hidrológica de bacias de retenção – Estudo de caso da bacia de retenção do Guará II – DF*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 70 p.

VON SPERLING, M. (2005). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG, Belo Horizonte- MG, 452 p.