

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

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA HIDRÁULICO-HIDROLÓGICA
E DE QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA DE DETENÇÃO
DO GUARÁ II - DF**

STEFANIE KATRIN FISCHER HENZ

ORIENTADOR: SÉRGIO KOIDE

COORIENTADORA: ANA CAROLINA VIEIRA DE PAULA

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

BRASÍLIA/DF: JULHO/2019

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

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA HIDRÁULICO-HIDROLÓGICA
E DE QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA DE DETENÇÃO
DO GUARÁ II - DF**

STEFANIE KATRIN FISCHER HENZ

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 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 (ENC/UnB)
(ORIENTADOR)**

**ARTHUR TAVARES SCHLEICHER, MsC (EnC/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**CAROLINNE ISABELLA DIAS GOMES, MsC (Adasa, DF)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 10 DE JULHO DE 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

HENZ, STEFANIE KATRIN FISCHER

Análise da eficiência hidráulico-hidroológica e de qualidade da água da lagoa de retenção do Guará II - DF.

xii, 90 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2018)

Monografia de Projeto Final 2 – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Drenagem urbana

2. Modelo SWMM

3. Lagoa de retenção

4. Escoamento superficial

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Henz, S.K.F. (2019). *Análise da eficiência hidráulico-hidroológica e de qualidade da água da lagoa de retenção do Guará II - DF*. Monografia de Projeto Final 2, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Stefanie Katrin Fischer Henz

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2: Análise da eficiência hidráulico-hidroológica e de qualidade da água da lagoa de retenção 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.

Stefanie Katrin Fischer Henz
stefaniehenz17@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Muitos me apoiaram nessa jornada de graduação em Engenharia Ambiental e merecem meu mais sincero agradecimento.

Primeiramente agradeço a Deus, por me permitir ter uma vida tão boa, cheia de saúde e ter me abençoado com uma família maravilhosa.

Não tenho palavras suficientes para agradecer aos meus pais, Liria e Senildo, e ao meu irmão, André. Nunca me faltou apoio, carinho e conforto. Sempre se apresentam dispostos a me ajudar e me carregaram de um lado pro outro nas diversas atividades da UnB. Muito obrigada por toda preocupação e cuidado que vocês têm comigo e principalmente por toda cobrança, sou eternamente grata por ter vocês.

Agradeço a todos professores que fizeram parte dessa graduação por todos ensinamentos e toda dedicação dada aos alunos. Em especial, agradeço ao meu orientador, Sérgio Koide, por todos conhecimentos repassados durante esse projeto e, também, a Maria Elisa, por toda paciência, cobrança e sempre estar disposta a ajudar.

Gostaria de agradecer também aos colegas, Carol, Daniel, Gabi, Rodrigo e Alice que ajudaram a obter todos os resultados desse trabalho. Afinal, foram muitos dias de campo, chuva e muitas horas de análises das amostras no laboratório. Um grande obrigada também as técnicas do laboratório, Carla's, Sara e Manu.

Me sinto muito sortuda de ter feito parte da equipe da SDU da Adasa durante meu estágio. Lá eu desenvolvi meu amor pela drenagem urbana e tive a oportunidade de aprender muito sobre área com todo o conhecimento do Jeferson, Montenegro, Carol, Raphael, Luciano e Dominiky. Um sonho seria voltar a trabalhar com essa equipe maravilhosa.

Agradeço também a todos os amigos que fiz durante a graduação, especialmente a Fabi, Murilo, Meinch, Math Rocha, Bela e Nicole, por todos os momentos de parceria, consolo, desespero e alegria passados juntos. E as minhas amigas de infância, Melina e Mayara, que sempre estiveram do meu lado para simplesmente tudo. E ao meu amor, Vitor, que fez com que esses dois últimos anos da graduação fossem mais leves, por todo seu apoio e companheirismo nos estudos e na vida.

Enfim, agradeço a todos que participaram de algum modo dessa jornada que está chegando ao fim. Sou grata por toda a experiência vivida durante o curso, e saio da UnB, por enquanto, completamente feliz.

RESUMO

A crescente urbanização resulta no aumento do escoamento superficial e, conseqüentemente, da poluição difusa, pois as águas pluviais transportam poluentes advindos das atividades antropogênicas até os corpos hídricos, deteriorando sua qualidade. Nesse contexto surgem as medidas compensatórias como tentativa de resolução de problemas oriundos da visão higienista até então adotada pela drenagem urbana. Entre essas medidas estão as lagoas de retenção, estruturas que visam o armazenamento temporário e a infiltração das águas pluviais, e são capazes de melhorar a qualidade da água. Este projeto buscou analisar a eficiência hidráulico-hidrológica e de qualidade da água da lagoa de retenção do Guará II – DF, em operação desde 2009. Para isso, realizou-se o monitoramento quantitativo e qualitativo, obtendo-se dados das precipitações, do nível da água na entrada e na saída da lagoa de retenção, assim como as vazões afluentes e efluentes, e foram coletadas amostras para a análise dos parâmetros de qualidade: nitrogênio, fósforo, DBO e coliformes. Os resultados foram analisados com o uso de hidrogramas e polutogramas para verificar o comportamento da lagoa no amortecimento das vazões nos picos de cheia e seu efeito sobre a carga de poluentes. A lagoa apresentou um amortecimento das vazões com eficiências maiores que 90%, porém não foi tão eficiente na redução de poluentes, que apresentaram pequena redução de concentração entre a entrada e a saída do dispositivo. Os eventos observados foram simulados com o modelo SWMM, e verificou-se que o modelo foi eficiente nas simulações de quantidade, mas os resultados obtidos nas simulações das cargas de nitrogênio total e fósforo total não foram satisfatórios. Conclui-se que a lagoa de retenção do Guará II é eficiente no amortecimento das vazões, por conta de seu grande volume, mas tem pouca influência sobre a carga de poluentes como nitrogênio, fósforo, DBO e coliformes.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS DA PESQUISA	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	QUALIDADE DE ÁGUA.....	6
3.3	DRENAGEM URBANA.....	9
3.3.1	Lagoa de retenção	14
3.3.2	Drenagem urbana no DF	18
3.4	MONITORAMENTO EM DRENAGEM URBANA.....	22
3.5	MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	24
3.5.1	SWMM.....	25
4.	METODOLOGIA.....	30
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	30
4.1.1	Clima e Solo	30
4.1.2	Bacia hidrográfica	31
4.1.3	Lagoa de retenção	32
4.1.4	Área de drenagem da lagoa de retenção	35
4.1.5	Uso e ocupação do solo	36
4.2	MONITORAMENTO	38
4.2.1	Banco de Dados.....	38
4.2.2	Monitoramento quantitativo	40
4.2.3	Monitoramento qualitativo	44
4.3	MODELAGEM	47
4.3.1	Base de dados	47
4.3.2	Parâmetros do modelo	47
4.3.3	Análise de eficiência e calibração	48
4.3.4	Simulação dos poluentes	49
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1	EVENTOS.....	50

5.2 DADOS DE PLUVIOMETRIA	51
5.3 DADOS DE VAZÃO	54
5.4 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA	57
5.4.1 Nutrientes	57
5.4.2 Matéria orgânica.....	68
5.4.3 Coliformes.....	70
5.5 MODELAGEM CHUVA-VAZÃO.....	73
5.5.1 Simulações dos eventos sem calibração.....	73
5.5.2 Calibração.....	74
5.5.3 Simulação dos eventos com o melhor conjunto de parâmetros	76
5.5.4 Comportamento da rede de drenagem e da lagoa de retenção	77
5.6 MODELAGEM DOS POLUENTES	79
6. CONCLUSÃO.....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Comportamento do balanço hídrico e o escoamento pré e pós-urbanização (Adasa, 2018).....	5
Figura 3.2. Comparação do modelo higienista para o modelo compensatório (Canholi, 2014).....	11
Figura 3.3. Hidrogramas pré e pós-urbanização, com e sem medidas de controle (Adasa, 2018).....	13
Figura 3.4. Instalações típicas de lagoas de retenção (Gribbin, 2008).	15
Figura 3.5. Exemplos de dissipadores de energia hidráulica, onde a foto da esquerda representa uma escada hidráulica.	16
Figura 3.6. Esquema de um vertedor de crista (Adasa, 2018).....	17
Figura 3.7. Deficiências na drenagem urbana no Distrito Federal: a) Alagamento na via W3 norte em outubro de 2018; b) Tesourinha na 109 norte alagada em abril de 2019; c e d) Bocas de lobo entupidas.	20
Figura 3.8. Órgãos responsáveis pela gestão dos serviços de drenagem no DF (Adasa, 2018).....	21
Figura 3.9. Fluxograma dos módulos do SWMM (Adaptado: Souza, 2014).....	26
Figura 4.1. Fluxograma da metodologia.....	30
Figura 4.2. Precipitação acumulada mensal em Brasília, no ano de 2017 (INMET, 2019).31	
Figura 4.3. Localização da área de estudo em relação as bacias hidrográficas do DF.....	32
Figura 4.4. Lagoa de retenção do Guará com estruturas de entrada e saída.	33
Figura 4.5. Poluição presente na área de estudo: a) entrada da galeria com água marrom e pastosa; b) acúmulo de lixo no lançamento da galeria; c) entulhos e lixo ao redor da lagoa.	34
Figura 4.6. a) área dentro da lagoa de retenção na primeira visita; b) área dentro da lagoa na segunda visita; c) Orifício de saída na segunda visita; d) área dentro da lagoa no dia 16/11/2018; e) Orifício de saída no dia 16/11/2018.....	35
Figura 4.7. Área de contribuição da drenagem para a lagoa de retenção (Volken, 2018)..	36
Figura 4.8. Mapa de uso e ocupação do solo (Volken, 2018).	37
Figura 4.9. Linígrafo de boia e régua instalados na saída da lagoa (foto da esquerda), detalhes do linígrafo (foto da direita).	39
Figura 4.10. Pluviógrafo instalado no telhado do Centro Comercial em Cruzeiro Velho. .	39

Figura 4.11. Localização dos pluviógrafos instalados.....	40
Figura 4.12. Distribuição da área de contribuição por pluviógrafo.....	41
Figura 4.13. Equipamento ADC.....	42
Figura 4.14. Curva-chave obtida para a entrada da lagoa de retenção.	43
Figura 4.15. Medição de vazão na saída da lagoa, na descarga de fundo, com o ADC.....	43
Figura 4.16. Curva-chave obtida para a saída da lagoa de retenção.	44
Figura 4.17. Amostrador ISCO aberto.	45
Figura 4.18. Entrada da lagoa de retenção, identificando as câmaras da galeria e o amostrador.	45
Figura 4.19. Amostrador instalado na saída da lagoa de retenção.....	45
Figura 5.1. Precipitação (volume acumulado em 5 minutos) no Evento 1 (08 e 09/12/18).	52
Figura 5.2. Precipitação (volume acumulado em 5 minutos) no Evento 2 (25/02/19).....	52
Figura 5.3. Precipitação (volume acumulado em 5 minutos) no Evento 3 (16 e 17/03/19)	52
Figura 5.4. Hidrograma do evento 1 (08/12/18).....	54
Figura 5.5. Hidrograma do evento 2 (25/02/19).....	55
Figura 5.6. Hidrograma do evento 3 (16 e 17/03/19).....	56
Figura 5.7. Análise das formas de Nitrogênio na entrada da lagoa de retenção no evento 1 (08/12/18).	58
Figura 5.8. Análise das formas de Nitrogênio na saída da lagoa de retenção no evento 1 (08/12/18-09/12/18).....	58
Figura 5.9. Análise das formas de Nitrogênio na entrada da lagoa de retenção no evento 2 (25/02/19).	59
Figura 5.10. Análise das formas de Nitrogênio na saída da lagoa de retenção no evento 2 (25/02/19 – 26/02/19).	59
Figura 5.11. Análise das formas de Nitrogênio na entrada da lagoa de retenção no evento 3 (16/03/19).	60
Figura 5.12. Análise das formas de Nitrogênio na saída da lagoa de retenção no evento 3 (16/03/19 – 17/03/19).	60
Figura 5.13. Análise de fósforo total na entrada da lagoa de retenção no evento 1 (08/12/18).	64
Figura 5.14. Análise de fósforo total na saída da lagoa de retenção no evento 1 (08/12/18 – 09/12/18).....	64
Figura 5.15. Análise de fósforo total na entrada da lagoa de retenção no evento 2 (25/02/19).	65

Figura 5.16. Análise de fósforo total na saída da lagoa de detenção no evento 2 (25/02/19 – 26/02/19).....	65
Figura 5.17. Análise de fósforo total na entrada da lagoa de detenção no evento 3 (16/03/19 – 17/03/19).....	66
Figura 5.18. Análise de fósforo total na saída da lagoa de detenção no evento 3 (16/03/19 – 17/03/19).....	66
Figura 5.19. Equipamento de análise de DBO.	69
Figura 5.20. Cartelas de análise de coliformes para a amostra da câmara 1 (foto da esquerda) e a amostra recolhida no poço de visita (foto da direita).	72
Figura 5.21. Simulação do evento 1.	74
Figura 5.22. Comparação dos hidrogramas para o evento 1.	75
Figura 5.23. Hidrograma calibrado na entrada da lagoa do evento 2.....	76
Figura 5.24. Hidrograma calibrado da entrada na lagoa do evento 3.....	77
Figura 5.25. Poços de visita em que ocorreu extravasamento para o evento 1.	78
Figura 5.26. Curva empírica para o nitrogênio total considerando todos eventos.	79
Figura 5.27. Curva empírica para o fósforo total considerando todos eventos.	79
Figura 5.28. Simulação de Ntotal para o evento 1.....	80
Figura 5.29. Simulação de Ptotal para o evento 1.	81
Figura 5.30. Carga de N total observada e simulada para o evento 1.	81
Figura 5.31. Carga de P total observada e simulada para o evento 1.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Classes de uso e ocupação da área de contribuição da rede de drenagem da lagoa de retenção (Volken, 2018; Tucci, 1995 modificado).....	37
Tabela 4.2. Parâmetros e métodos de análise da qualidade da água utilizados.....	46
Tabela 5.1. Resumo da coleta dos eventos de qualidade para a entrada e saída da lagoa... ..	50
Tabela 5.2. Eventos escolhidos para serem analisados para a lagoa de retenção.	51
Tabela 5.3. Dados de precipitação e o tempo de retorno para os 3 eventos analisados.	54
Tabela 5.4. Parâmetros estatísticos das análises de nitrogênio nas diferentes formas na entrada e na saída da lagoa de retenção.	62
Tabela 5.5. Parâmetros estatísticos para as concentrações de P total na entrada e na saída.	67
Tabela 5.6. Concentrações de DQO e DBO obtidas para o evento 1.....	69
Tabela 5.7. Parâmetros da eficiência do modelo para cada evento simulado.	73
Tabela 5.8. Incertezas definidas para cada parâmetro e as alterações feitas na calibração.	75
Tabela 5.9. Eficiência do modelo pré e pós calibração para os eventos simulados.	76
Tabela 5.10. Eficiência do modelo SWMM para as simulações de qualidade.....	80

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Adasa	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal
Caesb	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CHI	<i>Computational Hydraulics International</i>
CODHAB	Companhia de Desenvolvimento Habitacional do Distrito Federal
CORSAP	Consórcio Público de Manejo de Resíduos Sólidos e das Águas Pluviais da Região integrada do Distrito Federal e Goiás
COT	Carbono orgânico total
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DER-DF	Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal
DF	Distrito Federal
DQO	Demanda química de oxigênio
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
GDF	Governo do Distrito Federal
GIS	<i>Geographic Information System</i>
ha	Hectares
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRAM	Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Distrito Federal
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
L	Litros
m	Metro
MDT	Modelo Digital de Terreno
MÊTRO-DF	Companhia do Metropolitano do Distrito Federal
mm	Milímetro
NOVACAP	Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil
PGIRH	Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
RA	Regiões Administrativas
s	Segundos
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
Seduma	Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente do Distrito Federal
SEGETH	Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habitação
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SODF	Secretaria de Obras do Distrito Federal
SST	Sólidos suspensos totais
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
TERRACAP	Agência de Desenvolvimento do Distrito Federal – Companhia imobiliária de Brasília

1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresentou, entre os anos de 2000 e 2010, um aumento de 81% para 84% da população urbana, de acordo com os Censo Demográfico do IBGE, apresentando um processo acelerado de urbanização, o que acarretou o aumento de ocupações irregulares. Em algumas cidades brasileiras, a população em área irregular ou informal chega a 50% (Tucci, 2008). Esse fenômeno traz o aumento da impermeabilização dos solos, diminuindo a possibilidade de infiltração da precipitação, gerando um aumento no escoamento superficial. O planejamento e a gestão do saneamento não conseguem acompanhar essas mudanças, aumentando assim as chances de problemas de inundações, alagamentos e piora da qualidade dos cursos d'água por conta de poluição difusa, pois o escoamento carrega os resíduos sólidos e líquidos urbanos levando-os para os corpos hídricos receptores.

A primeira solução usualmente adotada para os sistemas de drenagem urbana segue a visão higienista, que consiste em afastar a água da fonte, adotando medidas estruturais por meio de canalização das águas. No entanto, na maioria das vezes isso transfere o problema para jusante. Visto isso, os sistemas de manejo de águas pluviais se desenvolveram, trazendo a ideia das medidas compensatórias, que visam à infiltração, à recarga, ao controle na fonte e ao armazenamento temporário da água drenada, como, por exemplo, as bacias de retenção.

As bacias ou lagoas de retenção são medidas estruturais que visam ao amortecimento dos picos de cheias, por meio do armazenamento temporário de parte do volume escoado superficialmente. Em geral, também são capazes de melhorar a qualidade da água drenada, por meio da retenção de poluentes e sedimentos. Essas lagoas podem ser projetadas para que, durante o período seco, possam ser utilizadas para outros propósitos, como ter função recreativa, fato que facilita a implantação destas, além de poder ser integrada ao local com função paisagística.

Inicialmente, no DF, as lagoas foram construídas visando apenas ao controle de pico de cheia. Após a Resolução Adasa nº 09/2011, passaram a ter como objetivo também a melhoria da qualidade da água drenada. Assim, inúmeras lagoas de retenção têm sido construídas no DF com o intuito de resolver problemas ligados à drenagem urbana, mas principalmente para proteção dos corpos hídricos receptores. Porém, depois que são construídas e colocadas em operação, pouca manutenção é realizada e praticamente não há um acompanhamento do seu desempenho.

Neste contexto, o presente trabalho escolheu como objeto de estudo a lagoa de retenção do Guará II – DF, que se encontra em operação há cerca de 10 anos, para analisar o comportamento da lagoa sobre a quantidade e a qualidade das águas afluentes. Estudou-se como ocorre a mitigação dos impactos no ciclo hidrológico decorrentes da urbanização e a eficiência da lagoa em seu aspecto de remoção de poluentes.

Foi realizado o monitoramento da área de estudo para se obter dados hidrológicos e de qualidade da água. O trabalho de monitoramento ocorreu de novembro de 2018 até maio de 2019. Durante esse período foram selecionados três eventos de precipitação que caracterizassem o comportamento da lagoa de retenção, para os quais foram elaborados hidrogramas, hietogramas e polutogramas para analisar os dados de entrada e saída da lagoa de retenção.

O uso de modelos auxilia na gestão das águas pluviais, no seu planejamento, no gerenciamento e para verificar o comportamento de um sistema de drenagem sob condições de precipitação. No presente trabalho foi utilizado o modelo hidráulico-hidrológico SWMM, sob interface PCWMM, para simular os aspectos quantitativos e qualitativos da água drenada. O modelo foi calibrado e verificado com base nos dados obtidos no monitoramento.

Este projeto está organizado em capítulos. O Capítulo 2 apresenta os objetivos, enquanto o Capítulo 3 aborda os conceitos relacionados ao tema, como águas urbanas, qualidade da água, drenagem urbana, monitoramento e modelagem. O Capítulo 4 trata sobre a metodologia adotada, apresentando a área de estudo, o plano de monitoramento e de modelagem. O Capítulo 5 traz os resultados obtidos e, por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do projeto.

2. OBJETIVOS DA PESQUISA

2.1 OBJETIVO GERAL

Este projeto tem como objetivo geral avaliar a eficiência da lagoa de retenção do Guará/DF, inserida no Parque Ezequias Heringer, em seu comportamento quantitativo e qualitativo sobre as vazões de águas pluviais afluentes, por meio de monitoramento hidrológico e de qualidade da água e por modelagem matemática utilizando o modelo SWMM.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar a capacidade de amortecimento dos picos de vazão de cheia da lagoa de retenção.
- Estudar e modelar as cargas de poluição difusa geradas pela bacia de drenagem em estudo.
- Analisar a influência da lagoa sobre a qualidade das águas pluviais afluentes, em eventos nos anos de 2018 e 2019, com ênfase nos nutrientes transportados nos eventos observados.
- Avaliar o comportamento hidrológico da bacia de contribuição ao reservatório de retenção, como também o comportamento hidráulico do dispositivo, por meio de simulações com o programa SWMM.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ÁGUAS URBANAS

As águas urbanas envolvem os quatro serviços de saneamento: abastecimento de água, esgotamento sanitário, drenagem urbana e gestão de resíduos sólidos (Tucci, 2008). Esses sistemas estão interligados a um centro urbano e sofrem alterações com o aumento da urbanização.

O desenvolvimento urbano brasileiro é marcado pela saída de populações do campo para centros urbanos e das pequenas cidades para cidades de médio e grande porte. Essa mudança não foi acompanhada de forma efetiva pelas políticas públicas de infraestrutura. Com isso observam-se deficiências em sistemas do saneamento em todas as cidades brasileiras, em maior ou menor grau (Porto, 2003).

A urbanização traz o aumento das áreas impermeáveis, diminuindo a oportunidade de infiltração e gerando um aumento e aceleração dos escoamentos superficiais; aumentando resíduos e sedimentos nos cursos d'água; e reduzindo a qualidade da água dos corpos hídricos por conta da poluição difusa (Silva, 2009). Essa crescente impermeabilização intensifica as consequências das chuvas, mudando o balanço hídrico pela retirada da cobertura vegetal e com conseqüente aumento do volume escoado superficialmente, e mudança dos picos de cheia dos hidrogramas, o que favorece a ocorrência de inundações (Porto, 2003). Essas alterações do balanço hídrico e do escoamento pós-urbanização podem ser observadas na Figura 3.1.

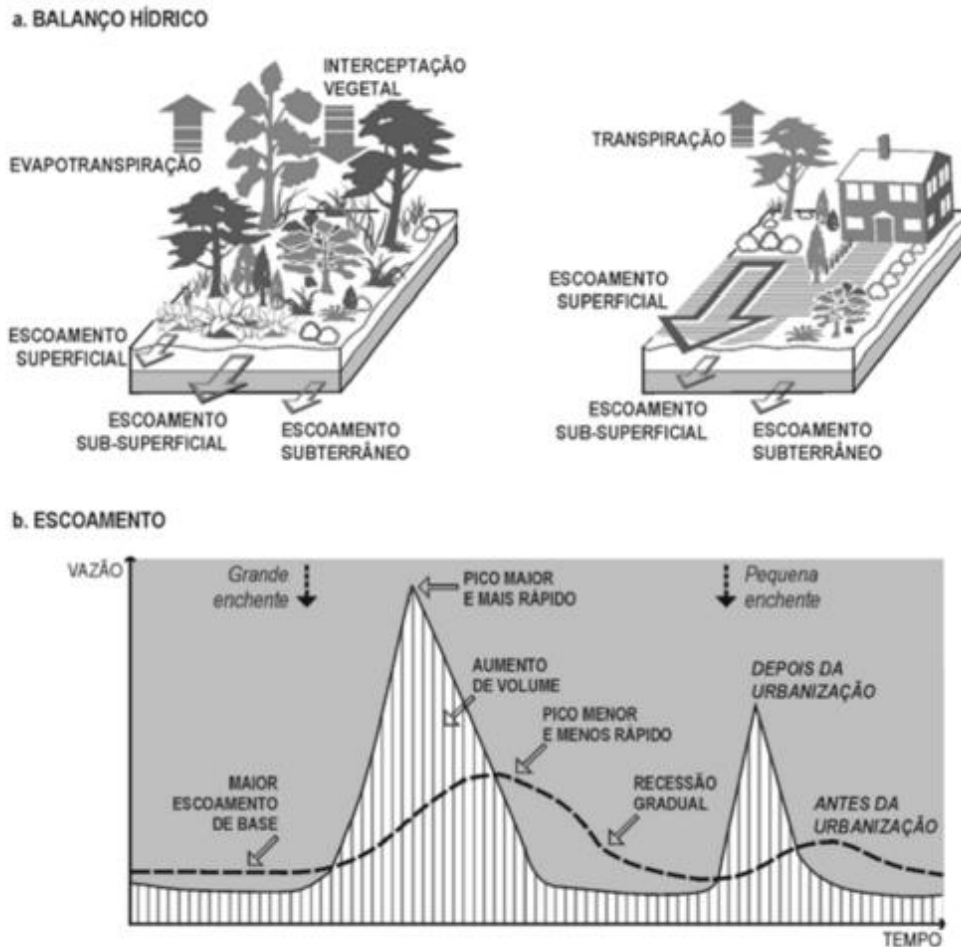


Figura 3.1. Comportamento do balanço hídrico e o escoamento pré e pós-urbanização (Adasa, 2018).

Além das alterações já apresentadas, a urbanização também traz mudanças climáticas. A retirada da cobertura natural diminui a evapotranspiração fazendo com que seja menor o aporte de água para a atmosfera, assim a umidade do ar diminui e a temperatura aumenta. Em centros urbanos a absorção da radiação solar por superfícies impermeáveis, como o asfalto e o concreto, produz as ilhas de calor, também aumentando a temperatura ambiente. Esses aumentos de temperatura criam condições de movimento de ar ascendente que pode gerar a elevação da intensidade das precipitações, e como no centro urbano as precipitações intensas são de baixa duração as enchentes urbanas são agravadas (Silveira, 1997).

Há uma relação direta entre a poluição difusa e a urbanização. De acordo com Urbonas e Stahre (1993), a poluição difusa de origem pluvial advém do arraste dos poluentes atmosféricos pela chuva e segue pelo escoamento superficial, o qual é o responsável direto pelo transporte dos poluentes dispostos sobre a superfície da área urbana até o corpo hídrico, sendo responsável por 25% a 40% da poluição destes cursos d'água no Brasil (Tomaz, 2006).

3.2 QUALIDADE DAS ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS

A poluição difusa, ao contrário dos lançamentos pontuais, é um fenômeno aleatório de difícil mensuração e cujas magnitudes dependem, principalmente, de fatores meteorológicos e do tipo de uso e ocupação do solo (Freitas, 2013). Nas cidades, a origem da poluição difusa é diversa, podendo ser de veículos, de freios de automóveis, resíduos de pneus, fezes de animais, de casas, de restos de vegetação, derramamentos, poeiras, metais, e ainda é possível ter interferência de ligações clandestinas de esgoto doméstico nas vias ou elementos de microdrenagem (Porto, 1995; Tomaz, 2006). Quanto mais urbanizada a cidade; quanto menos educada for a população; e quanto mais incipiente for o serviço de manejo de resíduos sólidos; mais fontes dessa poluição são comuns, influenciando na qualidade da água.

Segundo Salgado (2013) a poluição das águas é a soma das substâncias que modificam as características físicas, químicas e microbiológicas do corpo hídrico, podendo ser avaliada por meio dos parâmetros de qualidade da água, tais como pH, sólidos totais, em suspensão e dissolvidos, oxigênio dissolvido, turbidez, condutividade, nitrogênio (nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrito), fósforo, coliformes totais, DBO e DQO. Os principais poluentes encontrados no escoamento de águas pluviais urbanas são: nutrientes, sedimentos, substâncias consumidoras de oxigênio, metais pesados, hidrocarbonetos de petróleo, bactérias e vírus patogênicos (Tucci, 2005).

O estudo elaborado por Chebbo (1995) citado por Finotti *et al.* (2009), em um programa de pesquisa de qualidade de águas pluviais realizado na França, concluiu que a maior parte da poluição das águas pluviais encontra-se na forma suspensa. Essas partículas em suspensão apresentam uma grande quantidade de poluentes. Os materiais em suspensão são formados principalmente por minerais, enquanto os materiais orgânicos não passam de 20% (como hidrocarbonetos). Já os nitritos, nitratos e fosfatos encontram-se sob a forma dissolvida. As partículas mais finas (>100 micrômetros) concentram a maior parte dos poluentes, adsorvidas sobre sua superfície — mais de 50% da demanda química de oxigênio (DQO) e da DBO.

A matéria orgânica tem como fonte principal a descarga dos efluentes domésticos. A indicação indireta da quantidade de matéria orgânica na água pode ser determinada pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) ou pela Demanda Química de Oxigênio (DQO). A DBO de uma água é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia para uma forma inorgânica estável. Através do metabolismo dos microrganismos heterotróficos, os compostos orgânicos biodegradáveis

são transformados em produtos finais estáveis ou mineralizados, como água, gás carbônico, sulfatos, fosfatos, amônia, nitratos, dentre outros. Nesse processo há consumo de oxigênio da água e liberação de energia contida nas ligações químicas das moléculas decompostas. Em águas naturais não poluídas, a medida de DBO é inferior a 2 mg/L. A DQO é a quantidade de oxigênio necessária para oxidação da matéria orgânica de uma amostra por meio de um agente oxidante químico. Pode ser útil quando usada conjuntamente com a DBO para avaliação da biodegradabilidade dos despejos. Como a DBO mede apenas a fração biodegradável, quanto mais o valor da DBO se aproximar da DQO significa que mais biodegradável será o efluente. Valores elevados de DQO podem indicar problemas de contaminação dos corpos hídricos por despejos industriais (Righetto, 2009; Von Sperling, 2005; Finotti *et al.*, 2009).

Os nutrientes (fósforo-P e nitrogênio-N) são essenciais aos organismos vivos, mas níveis excessivos podem transtornar o equilíbrio natural do ecossistema, vindo a causar eutrofização. A origem do fósforo em corpos hídricos está relacionada com a deposição atmosférica, excremento de animais, do lixiviado de folhas de árvore e fertilizantes de gramado. O fósforo é um importante parâmetro de classificação das águas naturais, participando também na composição de índices de qualidade de águas. Também é um dos principais nutrientes para os processos biológicos, sendo exigido em grande quantidade pelas células (Ahlman, 2006).

O ciclo do nitrogênio é um dos ciclos mais importantes nos ecossistemas terrestres. O nitrogênio é usado pelos seres vivos para a produção de moléculas complexas necessárias ao seu desenvolvimento tais como aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos. O nitrogênio pode ser encontrado nas águas nas suas formas reduzidas (nitrogênio orgânico e amoniacal) e oxidadas (nitrito e nitrato). A presença de nitrogênio nos corpos hídricos resulta de processos biogênicos naturais que ocorrem no solo ou na água e do lançamento de efluentes, assim pode ter como fonte as lavagens pelas águas pluviais da atmosfera poluída, o escoamento pluvial nas áreas agrícolas com solos fertilizados, ou as áreas urbanas que carregam nitrogênio sob diversas formas. Elevadas concentrações de compostos nitrogenados podem ser um indicativo de poluição por matéria orgânica. Quando há predominância de nitrogênio amoniacal, o foco de poluição se encontra próximo. Se prevalecer nitrito e nitrato as descargas de esgotos estão distantes (Righetto, 2009; Von Sperling, 2005).

Coliformes totais é um termo que se refere a um grande grupo de bactérias Gram negativas que possuem a forma de bastonetes. Foram usados como indicadores de contaminação fecal

desde a década de 20. Porém, o grupo dos coliformes totais inclui todos os coliformes termotolerantes, as bactérias de origem fecal e algumas bactérias que podem ser isoladas do ambiente. Portanto, a presença de coliforme total em uma amostra pode ou não indicar contaminação fecal. Antigamente, conhecidos como “coliformes fecais”, são denominados termotolerantes por crescerem em condições de cultivo entre 44 e 44,5°C e fermentarem a lactose, produzindo ácido e gás. Essa temperatura é o fator de diferenciação entre os subgrupos fecais (termotolerantes) e não fecais (termosensíveis). Os termotolerantes são mais úteis como indicadores de contaminação fecal. Entretanto, alguns destes organismos também podem não ter origem fecal, portanto, o termo termotolerantes é mais correto. Na prática, tem-se o consenso de que a presença desses organismos numa amostra de água “quase sempre” indica contaminação fecal. Normalmente, mais de 95% dos coliformes termotolerantes isolados de amostras de água são da bactéria intestinal *Escherichia coli*, cuja presença prova, definitivamente, a origem fecal.

A *Escherichia coli* é uma bactéria coliforme, facultativamente anaeróbia, e normalmente encontrada no intestino grosso de animais endotérmicos, assim identificam a potencial contaminação das águas por fezes humanas ou de animais, uma vez que são veículos potenciais de transmissão de doenças e indicam possível presença de organismos patogênicos (Righetto, 2009). O ensaio de coliformes é uma contagem indireta dos patogênicos e é impreciso na determinação de vírus (Ahlman, 2006). Segundo Ellis e Mitchell (2006), a faixa concentração de *Escherichia coli* nas áreas residenciais e comerciais é de 0 a 104 NMP/100mL e nas auto-estradas, esse faixa é de 0 a 102 NMP/100mL.

Gomes (2015) avaliou a qualidade de águas pluviais a montante e a jusante de oito bacias de retenção no DF utilizando como parâmetros de qualidade: condutividade, cor aparente, DBO, DQO, fósforo total, nitrato, amônia, óleos e graxas, sólidos dissolvidos, sólidos suspensos, sólidos totais, turbidez, coliformes termotolerantes e pH. Os resultados obtidos foram analisados conforme os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, e obteve que sete conjuntos apresentaram alguns dos parâmetros em desacordo com esses limites para corpos hídricos de classe II. Adicionalmente, as diferenças entre as análises feitas à montante e à jusante das bacias não foram significativas, indicando que as bacias não estão funcionando a contento.

O comportamento da concentração de poluentes ao longo do tempo para um evento da chuva pode ser uma informação necessária de acordo com a finalidade do estudo proposto. A obtenção dessa variação envolve atividades detalhadas, desde a caracterização da bacia de

drenagem, bem como dos parâmetros envolvidos, tanto quantitativos como qualitativos. O gráfico que apresenta a variação temporal da concentração dos poluentes das águas do escoamento superficial é denominado “polutograma” e é semelhante ao histograma, permitindo que sejam analisados conjuntamente (Baptista e Nascimento, 2005).

Aguiar *et al.* (2018) analisaram a qualidade das águas pluviais para um evento chuvoso na estação de monitoramento do Riacho Fundo I utilizando polutogramas juntamente com hidrogramas. Foi feita a análise de parâmetros referentes a matéria orgânica, nutrientes e sedimentos, como nitrito, nitrato, amônia, fósforo reativo e total, sólidos totais e suspensos e DQO. Os autores observaram que o pico dos polutograma ocorre anteriormente que o pico do hidrograma. Os resultados das análises apresentaram altas concentrações de fósforo reativo e DQO, parâmetros que podem indicar lançamentos nos sistemas de drenagem.

Adicionalmente, Righetto (2009) ressalta que é muito importante que a avaliação da qualidade da água contemple monitoramento de precipitação e vazão, e que as características do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica são importantes aspectos a serem levados em consideração na escolha das variáveis que serão monitoradas.

A concentração de poluentes ao longo do tempo associada a um determinado evento pluviométrico é uma informação útil para o gerenciamento da drenagem urbana, planejamento e dimensionamento de estruturas de controle de poluição (Ferreira, 2008).

3.3 DRENAGEM URBANA

A Lei Federal nº 11.455/2007 define saneamento básico como “um conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, e drenagem e manejo de águas pluviais”. Em seu 3º artigo, inciso I, alínea ‘d’, a lei define drenagem como constituída pelas atividades, pela infraestrutura e pelas instalações operacionais de drenagem de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas, contempladas a limpeza e a fiscalização preventiva das redes, pela Lei nº 13.308/2016.

A preocupação com o manejo das águas pluviais surge por conta dos problemas advindos da impermeabilização das cidades, como os alagamentos, as inundações e a contribuição para poluição dos corpos hídricos.

Essa preocupação ganha destaque com uns dos instrumentos promovidos pela Lei de Saneamento, os planos de drenagem urbana. Estes objetivam criar mecanismos de gestão para a bacia hidrográfica, para o zoneamento urbano, e para as estruturas de macro e microdrenagem. O plano deve se basear em alguns princípios, como: os novos empreendimentos não podem aumentar a vazão máxima de jusante; o planejamento e controle dos impactos existentes devem ser elaborados considerando a bacia como um todo; o planejamento deve estar integrado ao Plano Diretor da cidade; e o controle dos efluentes deve ser avaliado de forma integrada com o esgotamento sanitário e os resíduos sólidos (Tucci, 2003; Canholi, 2014).

Os sistemas de drenagem mais difundidos no Brasil, ainda, são os com visão higienista que transportam as águas pluviais para longe de áreas com tendência a alagamento. O Brasil adota um sistema de esgotamento do tipo separador absoluto convencional, onde a água pluvial e esgoto são transportados em canalizações distintas, com a água pluvial sendo lançada diretamente no corpo hídrico e os esgotos são encaminhados para uma estação de tratamento de esgoto. A operação desses dois sistemas não é integrada, sendo realizado por entidades diferentes, fato que complica a gestão dessas quando ocorrem problemas de ligações clandestinas de esgoto na rede de drenagem e vice-versa (Adasa, 2018; Von Sperling, 2006).

Conforme Canholi (2005) e Von Sperling (2006), a visão higienista trouxe medidas como a canalização de córregos urbanos, e evacuação das águas de chuva por condutos subterrâneos com implantação de galerias e canais de concreto, que com o tempo, mostraram-se ineficientes para conter as cheias na sua totalidade, pois esse controle apenas é efetivo no local, transferindo os efeitos para jusante. A partir da década dos anos 90 o Brasil começou a adotar em algumas localidades um modelo de técnicas compensatórias que visa, por exemplo, ao armazenamento temporário do excedente superficial e/ou a infiltração dele, ou parte, no solo, ao invés da ideia de retirar o excedente o mais rápido possível da bacia hidrográfica. A diferença do modelo higienista para um modelo que contemple técnicas compensatórias pode ser exemplificada na Figura 3.2, onde a canalização mantém um hidrograma com picos elevados, enquanto a reservação traz picos reduzidos.

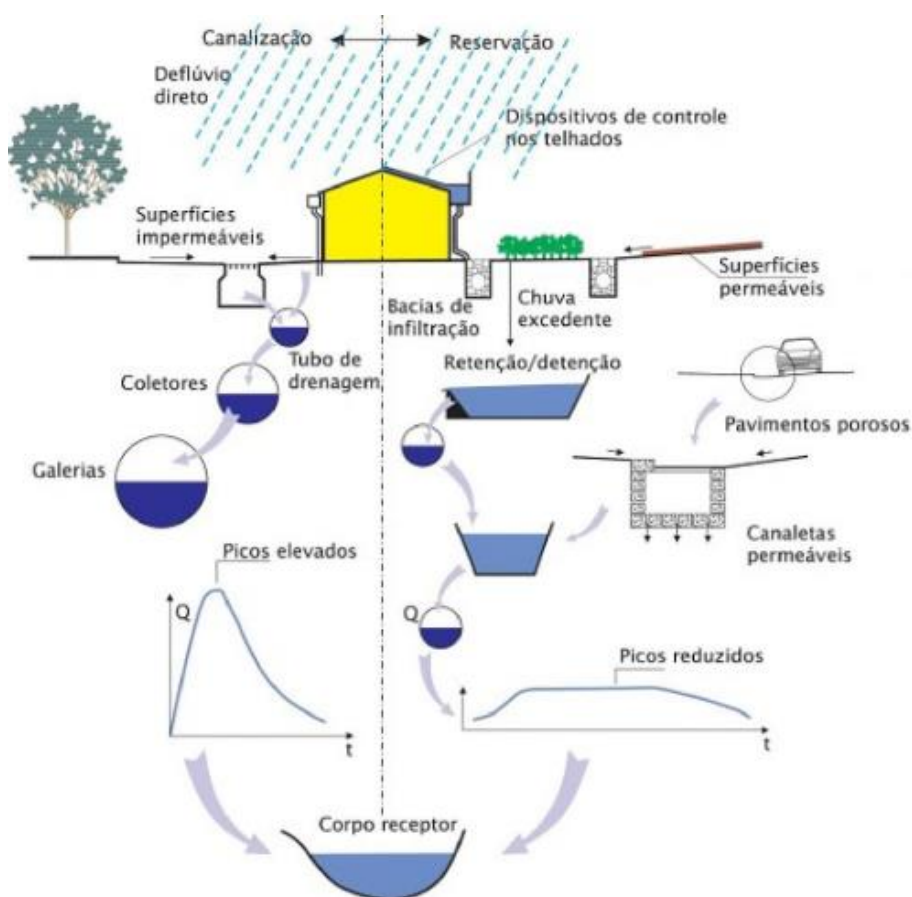


Figura 3.2. Comparação do modelo higienista para o modelo com técnicas/medidas compensatórias (Canholi, 2014).

As medidas de controle na fonte já fazem parte dos sistemas de drenagem urbana, de acordo com o Manual de Drenagem do DF (Adasa, 2018) juntamente com as tradicionais microdrenagem e macrodrenagem. A microdrenagem e a macrodrenagem se diferenciam pelos tamanhos dos dispositivos adotados. A microdrenagem é composta por dispositivos que drenam o sistema viário, como: sarjetas, canaletas, captações, condutos de ligação e tubulações com diâmetro máximo de 0,8 metros. Já a macrodrenagem é formada por canais, galerias e tubulações com diâmetro mínimo de 1,0 metro, que recebem a vazão das redes de microdrenagem. As medidas de controle na fonte consistem em dispositivos de amortecimento e infiltração instalados junto à origem do escoamento pluvial (Adasa, 2018).

Atualmente, existe uma ampla gama de estruturas que atuam como medidas compensatórias, além de visarem ao armazenamento e à infiltração do escoamento, essas medidas também podem promover a interceptação e a evapotranspiração (Ellis, 2008). Como exemplos de técnicas compensatórias têm-se: telhado verde, microrreservatório, poço de infiltração, trincheira de infiltração, vala de retenção, pavimento permeável, lagoas de retenção ou infiltração.

A escolha da medida mais adequada para um determinado local varia de acordo com as características da área e da estrutura a ser implantada, por exemplo, de acordo com a permeabilidade do solo, a declividade do terreno, a área de drenagem que precisa ser controlada, o aporte de sólidos, a área disponível para a instalação e o tempo de retorno para o controle da vazão de pico (Righetto, 2009).

As medidas de controle na fonte podem ser implantadas em lotes privados, e em áreas públicas como escolas, hospitais, praças, pátios e vias públicas. O abatimento da vazão se dá por meio da infiltração, ou pelo armazenamento temporário. Alguns dispositivos são capazes de atender às duas funções, como por exemplo, pavimento permeável, trincheira de infiltração, poço de infiltração, reservatório de detenção aberto, e reservatório de retenção aberto, os quais abatem a vazão por infiltração e armazenamento. Já o telhado reservatório apenas armazena, e a faixa gramada atua por infiltração (Adasa, 2018).

Urbanas e Stahre (1993) apresentam algumas vantagens e desvantagens da utilização de medidas de controle na fonte. Tem-se como vantagens:

- versatilidade de local para a instalação e padronização dos dispositivos;
- diminuir a vazão nos canais existentes e melhorar a qualidade da água e da recarga dos aquíferos.

Em contrapartida a fiscalização da operação e da manutenção é dificultada, depende de capital dos proprietários privados, e há conflito de interesse com o uso da água de chuva.

Para facilitar a inserção urbanística das medidas compensatórias deve-se considerar o possível uso múltiplo dessas, como fazer com que estas façam parte do paisagismo de um parque, associando-se a áreas verdes, e sirvam até como uma área para recreação, no caso de bacias secas. Também é importante para promover a aceitação dessas soluções pela população (Righetto, 2009).

Medidas de controle ideais devem impedir que novos empreendimentos urbanísticos sobrecarreguem o sistema público de drenagem, assim a vazão adicional gerada deve ser armazenada ou infiltrada pela implantação de dispositivos de controle. A Figura 3.3 mostra a alteração no hidrograma sem a utilização de medidas de controle e com a utilização dessas.

A vazão de restrição apresentada como meta é equivalente à vazão máxima na situação de pré-urbanização (Adasa, 2018).

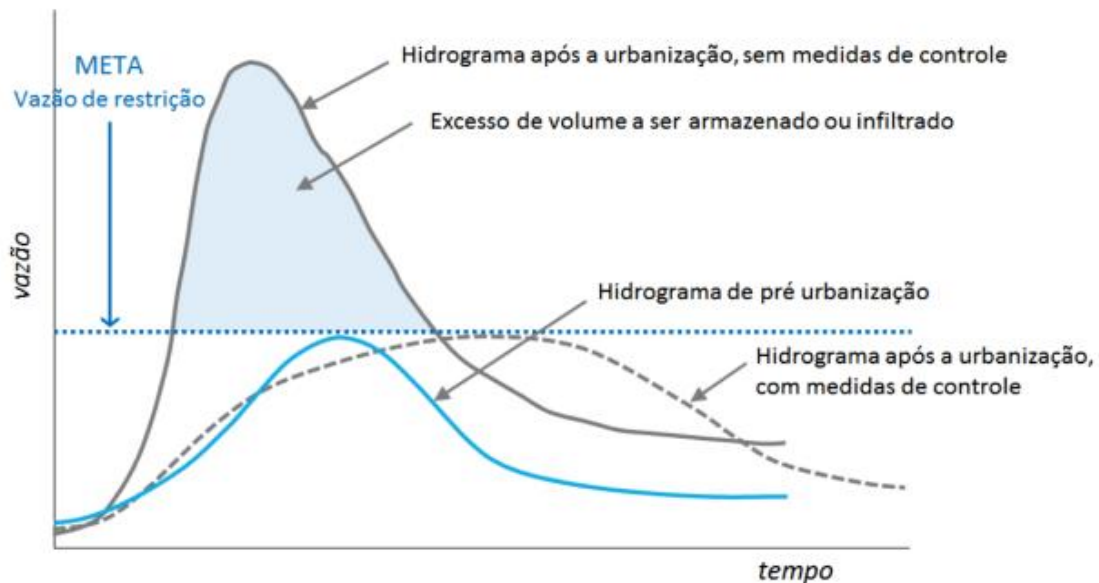


Figura 3.3. Hidrogramas pré e pós-urbanização, com e sem medidas de controle (Adasa, 2018).

A área sob o hidrograma após a urbanização, com medidas de controle, observado na Figura 3.3, representa a área do excesso de volume, menos o volume que foi infiltrado e armazenado pelo dispositivo de controle.

As medidas que favorecem a infiltração, desconsiderando as de controle na fonte, necessitam de áreas relativamente grandes dificultando a utilização dessas em locais de ocupação muito densa, assim uma medida para essas situações é a utilização de reservatórios ou lagoas de detenção e retenção. De acordo com estudos já desenvolvidos por simulação matemática, reservatórios e lagoas apresentam-se como alternativa viável para redução dos picos dos hidrogramas de cheia (Silva, 2006; Campana *et al.*, 2007).

As lagoas são consideradas medidas de controle de drenagem urbana estruturais, são implementadas por meio de obras de engenharia que visam à correção e à prevenção dos problemas das enchentes, como a canalização e a construção dos reservatórios. Porém, para uma otimização da sua eficiência, sua implantação deve estar também associada às medidas não estruturais, como a modernização de normas, regulamentos e programas que visem à melhoria e controle do sistema, sendo eficazes a custos mais baixos (Canholi, 2014; Tucci, 2002).

3.3.1 Lagoa de detenção

As lagoas de detenção apresentam efetividade no manejo de águas pluviais no aspecto quantitativo e qualitativo, sendo capazes de amenizar diversos efeitos da urbanização por serem obras destinadas tanto ao amortecimento da vazão das ondas de cheia, pelo armazenamento temporário, que ainda promove a infiltração da água no solo recarregando os aquíferos e reduzindo o volume de escoamento que será liberado; quanto destinadas à remoção de poluentes carregados pelos escoamentos, atuando na melhoria da qualidade da água. No entanto, essas duas funções podem ser conflitantes no aspecto do tempo, pois o tempo necessário para melhoria na qualidade da água, ou seja, para haver boa remoção de poluentes, é muito superior em relação ao tempo necessário para conter as vazões de cheia (Berque e Ruperd, 2000; Gribbin, 2008).

Os sistemas das lagoas de detenção são projetados para funcionar em série com a rede de drenagem, sendo esvaziadas completamente entre eventos. Geralmente são projetadas para que esse esvaziamento dure até 24 horas, no entanto em alguns projetos não é um tempo suficiente para se obter uma boa remoção dos poluentes (Righetto, 2009).

Os poluentes chegam à lagoa pelo escoamento superficial das águas pluviais que lavam o pavimento e causam a erosão do solo, trazendo sólidos suspensos, nutrientes, metais pesados, matéria orgânica, óleos e gorduras (Matias, 2006). As lagoas retêm essas substâncias principalmente pela sedimentação, mas dependendo das propriedades da substância processos como adsorção, degradação microbiana e volatilização também podem ser importantes (Harrel e Ranjithan, 2003). A sedimentação é o processo físico de separação de partículas sólidas com densidade superior à do líquido circundante, e esta ocorre na lagoa de detenção pois a velocidade horizontal da água é baixa, e a gravidade provoca a tendência das partículas de dirigirem para o fundo da estrutura (Silva, 2009).

As lagoas de detenção e de retenção são vistas como obras de contenção de escoamentos a jusante. Uma diferença entre estas, sob o critério paisagístico, reside no fato de que as lagoas de retenção são dimensionadas para terem uma lâmina de água permanente, enquanto as de detenção são secas, somente recebendo águas pluviais durante o período das chuvas (Porto, 2002; Canholi, 2005). As lagoas de retenção são vistas como lagos artificiais menores que controlam as vazões de escoamento em episódios de chuvas intensas, pois permitem a redistribuição temporal e a atenuação dos fluxos (Von Sperling, 2006).

Como vantagens das lagoas de retenção: melhoram a qualidade da água pluvial; mitigam a erosão; aumentam o tempo de resposta do escoamento superficial a jusante, pois amortecem as vazões de cheia retardando o pico; e ainda podem ser usadas como espaço para lazer e recreação (Assunção, 2012; Porto, 2003). Como desvantagens tem-se a necessidade de grandes áreas para se alocar a lagoa, pois são projetadas para áreas de drenagem maior que 5 ha (hectares); e a necessidade de aceitação da população que mora ao redor de onde seria instalada a lagoa (Canholi, 2005).

As lagoas de retenção em sua maioria são projetadas com instalação a céu aberto, sendo áreas escavadas no solo capazes de armazenar temporariamente um grande volume de precipitação. Porém, quando não há espaço, tem-se a opção de lagoas de retenção formadas com tubos subterrâneos. No entanto, a capacidade destas últimas é limitada, além de não ter os benefícios da infiltração e da retenção dos sedimentos, e ainda apresentar um custo maior de instalação (Gribbin, 2008). A diferença entre essas duas possíveis instalações de lagoa de retenção é observada na Figura 3.4.

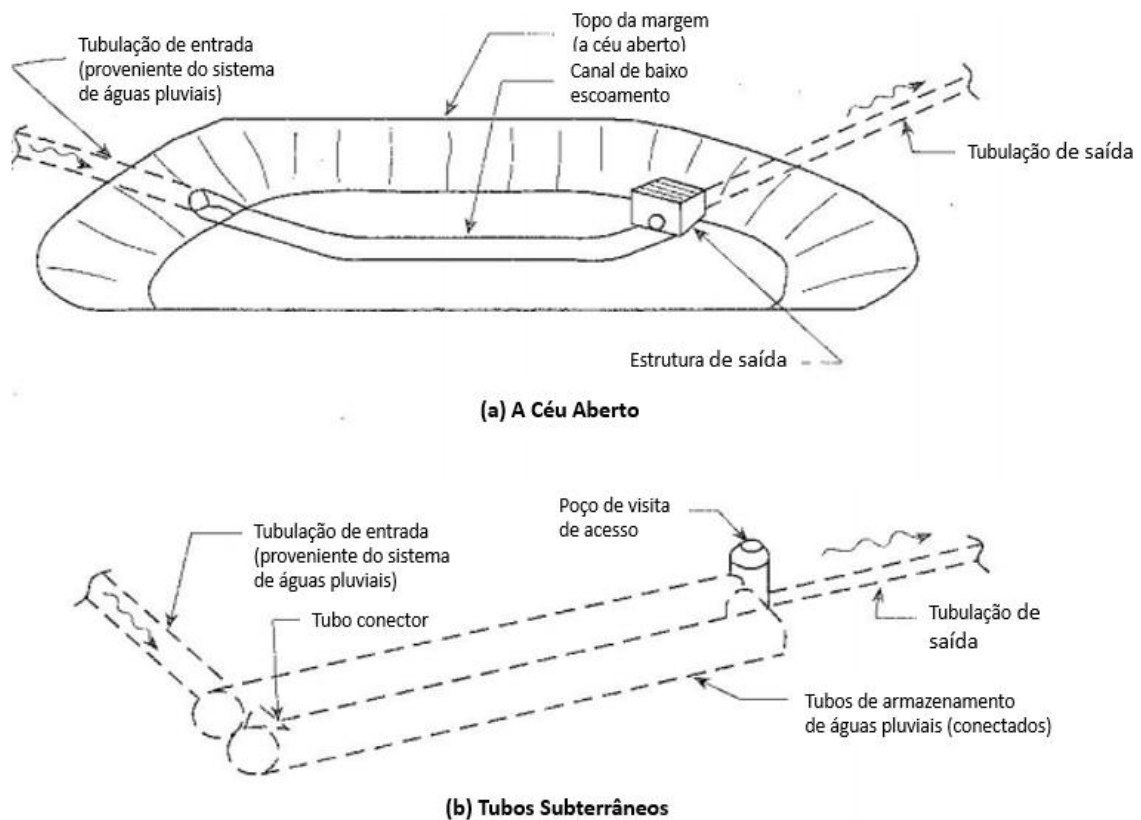


Figura 3.4. Instalações típicas de lagoas de retenção (Gribbin, 2008).

Os critérios operacionais e a manutenção definem o bom funcionamento da lagoa de retenção e a sua vida útil. Desde a fase do planejamento deve-se levar em conta os custos e a facilidade de manutenção de todas as estruturas presentes na lagoa (Assunção, 2012). Um critério que deve ser verificado é a necessidade de instalação de dissipadores de energia hidráulica (Figura 3.5) onde há a entrada de água na lagoa, para diminuir a velocidade da água drenada. Como exemplo de estruturas de dissipação podem ser utilizadas escadas hidráulicas na saída da galeria que traz as águas pluviais (Canholi, 2005).



Figura 3.5. Exemplos de dissipadores de energia hidráulica, onde a foto da esquerda representa uma escada hidráulica.

A lagoa de retenção deve liberar a água armazenada lentamente por uma estrutura de saída, que pode ser uma saída única, através de um ou mais orifícios, e um vertedor, sendo este segundo uma liberação de emergência, quando o orifício não suportar todo o escoamento da precipitação. Essa saída conjunta pode ser exemplificada por um vertedor de crista, apresentado na Figura 3.6, que apresenta um descarregador de fundo que seria o orifício principal de saída em uma cota inferior, e o vertedor de emergência em uma cota superior. Para garantir o bom funcionamento, o orifício de saída deve estar sempre aberto, garantindo o esvaziando constante até a lagoa ficar vazia, enquanto o vertedor garante o extravasamento da água para o canal de saída quando a lagoa alcançar seu volume máximo (Adasa, 2018; Gribbin, 2008).

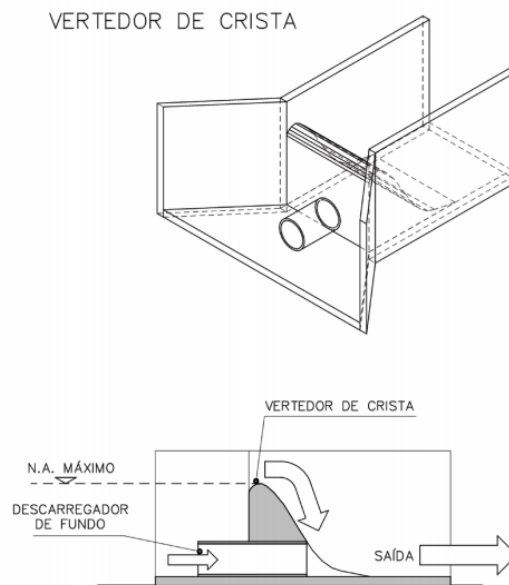


Figura 3.6. Esquema de um vertedor de crista (Adasa, 2018).

A manutenção da lagoa de retenção pode ser preventiva ou corretiva. Como atividades preventivas têm-se o controle do desenvolvimento da vegetação aquática, e a melhora nos serviços de limpeza urbana; e como atividades corretivas há a limpeza do reservatório e as correções de estruturas hidráulicas irregulares. A manutenção da lagoa deve ser contínua, para evitar a obstrução da estrutura de saída (Baptista *et al.*, 2011).

Muitos estudos vêm sendo realizados ao redor do mundo sobre a análise de projetos para lagoas de retenção, especificamente que visam soluções alternativas para instalação destas e avaliam aspectos da qualidade da água do reservatório e a retirada dos sedimentos pela lagoa.

Por exemplo, Choodegowda *et al.* (2015) desenvolveram um projeto preliminar de uma lagoa de retenção para três diferentes eventos de chuva (eventos de 5, 25 e 100 anos), em um Campo de Golfe em Little Kitten Creek, Kansas, EUA. A dimensão, a forma e as estruturas de saída da lagoa foram selecionadas no modelo e foi desenvolvida uma relação profundidade-armazenamento. Como estrutura de saída da lagoa foram selecionados um orifício e um vertedor de emergência. Simulações baseadas no evento de 100 anos superaram a lagoa de retenção projetada, precisando de uma lagoa maior que implicaria em custos elevados e reduziria o valor estético da propriedade nas proximidades da lagoa de retenção. Assim, em vez de usar uma grande lagoa de retenção dentro da bacia hidrográfica, recomendou-se que uma série de lagoas de retenção menores (espalhadas dentro da bacia

hidrográfica) fossem construídas para mitigar os impactos, tornando o ambiente esteticamente agradável.

Mah e Ho (2017) exploraram a ideia de incorporar uma lagoa de retenção seca em uma rotatória grande, com área de 31000 m², para resolver um problema de aumento de escoamento de água pluvial por conta da construção de um setor habitacional na cidade Kuching, na Malásia. Pelo programa SWMM, eles simularam como a lagoa deveria ser dimensionada e integrada ao sistema de drenagem existente, para conter o escoamento de um evento de 100 anos de recorrência. Foram simulados dois eventos, um com a rede atual de drenagem, e outro com a presença da lagoa de retenção. Verificaram que a lagoa seria capaz de conter todo o escoamento vindo do setor habitacional, diminuindo o pico da vazão.

Schroer *et al.* (2018) quantificaram as fontes e as taxas de sedimentação de carbono (C) e nutrientes (nitrogênio [N] e fósforo [P]) em 14 lagoas de retenção de águas pluviais, representativas do desenvolvimento residencial típico no litoral da Carolina do Sul. As taxas de acumulação de sedimentos e a perda de volume do lago foram menores do que o previsto de acordo com as diretrizes de manutenção fornecidas pelo Estado. Essas taxas foram semelhantes às observadas em sistemas lacustres, mas inferiores aos observados em reservatórios ou represas. As lagoas de retenção são vistas como componente chave na compreensão de como a urbanização altera o transporte e as transformações de carbono e nutrientes entre o solo e as águas receptoras.

Esses estudos trazem algumas questões interessantes e podem ser ligadas. O projetista não deve focar o projeto apenas de uma grande lagoa, pois pequenas lagoas espalhadas podem ser mais eficientes e ocupar espaços menores, além de poder utilizar locais que, muitas vezes, só tem função paisagística para a implementação de uma lagoa de retenção.

3.3.2 Drenagem urbana no DF

O Distrito Federal (DF) é dividido em 31 regiões administrativas (RA) para uma melhor administração do território e das populações. Segundo o Plano Diretor de Ordenamento Territorial o território do DF tem padrão extensivo de ocupação do solo urbano. Esse padrão é bem visível no Plano Piloto, Lago Sul, Lago Norte e Park Way. Porém as RAs, Candangolândia, Núcleo Bandeirante, Guará, Riacho Fundo, Ceilândia, Taguatinga, Samambaia e Águas Claras apresentam um padrão intensivo do uso do solo, concentrando uma população três vezes maior que a área central de Brasília (GDF, 2009).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE, 2017) o Distrito Federal foi a unidade com maior crescimento populacional entre 2012 e 2017, com um aumento de 11,4% no número de habitantes nas regiões administrativas de Brasília.

Saber como ocorre a ocupação do território e o crescimento populacional de uma cidade é importante pela relação direta destas com a impermeabilização, a qual diminui a infiltração e aumenta o escoamento superficial. Assim o conhecimento da ocupação é fundamental para o dimensionamento do sistema de drenagem.

A ocupação do solo urbano no DF ocorre por meio de iniciativa do Estado, via seus órgãos de planejamento urbano SEDUH, SODF e CODHAB, e por meio de ocupações irregulares. Essa irregularidade existe pela pressão do mercado sobre as propriedades públicas, áreas de grande extensão no DF (GDF, 2009).

As ocupações irregulares transferem os impactos do desenvolvimento para jusante e não seguem princípios adequados de projetos de saneamento, gerando contaminação das áreas de mananciais. A impermeabilização descontrolada traz problemas de erosão e assoreamento por causa de aumento de velocidade do escoamento, gerando áreas degradadas que comprometem a infraestrutura e o meio ambiente das áreas urbanas. Com o crescimento populacional que ocorreu no DF, vias e outras áreas passaram a sofrer alagamentos em determinados eventos chuvosos, pois os condutos não foram dimensionados para a vazão atual (GDF, 2009). Esses alagamentos são intensificados pelo fato de a manutenção do sistema de drenagem ser deficiente no DF, uma vez que a NOVACAP, responsável por esse serviço, por exemplo, não consegue realizar toda a limpeza das bocas de lobo, bueiros e galerias de Brasília, o que leva a constantes entupimentos dessas estruturas pelo acúmulo de lixos e podas. Na Figura 3.7 é possível observar algumas fotos desses eventos. A NOVACAP não possui planos ou programas de manutenção de suas estruturas de drenagem, tais como suas lagoas ou galerias, apenas planos remediativos ou emergenciais (Adasa, 2018). As áreas apresentadas na Figura 3.7 são áreas consolidadas e de ocupação extremamente restritiva, o que representa que o manejo correto de águas pluviais não fica restrito apenas às ocupações irregulares, pois até nas legalizadas parece não haver um manejo primoroso.



Figura 3.7. Deficiências na drenagem urbana no Distrito Federal: a) Alagamento na via W3 norte em outubro de 2018; b) Tesourinha na 109 norte alagada em abril de 2019; c e d) Bocas de lobo com grelhas entupidas.

Os sistemas de drenagem tradicionais utilizados no DF são os do tipo separador absoluto. Porém, além dos problemas ocasionados pelo grau de impermeabilização descontrolado, o sistema de drenagem urbana no DF recebe interconexões clandestinas de esgoto, deteriorando a qualidade das águas pluviais e dos corpos receptores (GDF, 2009).

O sistema de drenagem urbana existente no Distrito Federal foi implantado pela NOVACAP desde a época de 60, utilizando bases conceituais de um sistema tradicional. Constitui-se basicamente pela conjugação de sarjetas, canaletas, bocas de lobo, poços de visitas, redes tubulares, galerias celulares e estruturas finais de lançamento, proporcionando coleta e afastamento das águas de chuva de forma rápida. No início dos anos 90, a NOVACAP começou a prever em seus projetos de drenagem as lagoas de retenção e infiltração, com o objetivo de minimizar o impacto ambiental causado pelo aumento da vazão a ser lançada nos corpos hídricos. Em 2016, havia 51 lagoas de retenção presentes no cadastro da NOVACAP e em operação no DF, distribuídas nas diversas Regiões Administrativas (NOVACAP, 2016).

A gestão dos serviços de drenagem e manejo de águas pluviais no DF é feita por um conjunto de órgãos e entidades públicas, de acordo com as suas competências e atribuições representadas na Figura 3.8.

Competências e Atribuições	Governo do Distrito Federal – Instituições
Planejamento	• SINESP • CORSAP ¹
Regulação e Fiscalização	• ADASA
Prestação de Serviços	• NOVACAP • DER-DF
Órgãos Intervenientes	• METRÔ-DF • TERRACAP • CODHAB • ADMINISTRAÇÕES REGIONAIS
Licenciamento	• IBRAM
Outorga de Recursos Hídricos	• ADASA
Ouvidoria	• OUVIDORIA GERAL DO DF E OUVIDORIAS DE CADA ÓRGÃO

¹ Responsabilidade pelo planejamento das águas pluviais é definida na legislação, porém atualmente não é praticada pelo CORSAP

Figura 3.8. Órgãos responsáveis pela gestão dos serviços de drenagem no DF (Adasa, 2018).

Em 08 de abril de 2011, a Adasa publicou sua resolução nº 09, um pioneiro instrumento de gestão de águas urbanas que surgiu como uma medida preventiva para manter a qualidade e quantidade dos corpos hídricos do DF, a qual estabeleceu procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga do direito de uso dos recursos hídricos para lançamento de águas pluviais em corpos de domínio do Distrito Federal. Esses procedimentos se aplicam para novas construções, porém as antigas deveriam regularizar seu lançamento. A outorga de lançamento de águas pluviais em corpo hídrico superficial limita-se a vazão específica até 24,4 L/(s.ha), considerando chuvas com tempo de recorrência de 10 anos (Adasa, 2011; Tucci, 2016).

Alguns trabalhos realizados constataram que essa vazão não é respeitada por setores habitacionais espalhados pelo DF. O estudo de Silva (2017) avaliou que as cinco sub-bacias de drenagem da RA Varjão lançam águas pluviais em direção ao Ribeirão do Torto com vazões de saída da rede muito superiores ao limite imposto pela legislação. Assim é necessária a existência de dispositivos que sejam capazes de adequar o lançamento do Varjão ao limite imposto pela legislação vigente.

Fileni (2017) realizou simulações hidrológicas em quatro sub-bacias urbanas na Região Administrativa de Ceilândia para verificar se a rede existente era adequada para uma

precipitação com tempo de retorno de 10 anos, tempo adotado pelo PDDU/DF, e analisou a implantação de técnicas de drenagem sustentável. A rede existente apresentou uma vazão de saída em desacordo com a Resolução 09/2011 da Adasa. O autor indicou que a implantação de técnicas compensatórias de drenagem, que desempenham a função fundamental de atenuar o pico de vazão na saída da rede de drenagem, atenderiam à vazão correspondente ao seu estágio de pré-desenvolvimento, respeitando a Resolução 09/2011 da Adasa.

O estudo de Pinto (2017) avaliou a rede de drenagem em 350 hectares no bairro Asa Norte, em Brasília, e esta apresentou uma vazão máxima de 44,83 L/s.ha, o que supera em muito a vazão limite da Resolução citada anteriormente. Para sanear este problema, o estudo também propôs a implantação de bacias de quantidade e trincheiras de infiltração para reduzir esta vazão e assim atender a resolução.

3.4 MONITORAMENTO EM DRENAGEM URBANA

O monitoramento aborda o conhecimento de determinado sistema através do acompanhamento deste no tempo e no espaço produzindo informações que serão usadas para tomadas de decisão. O monitoramento hidrológico pode ser quantitativo e qualitativo: o monitoramento de quantidade consiste em medições de precipitação, volume, vazão, e níveis d'água de um corpo hídrico, enquanto o da qualidade requer conhecimento dos elementos presentes na água. Os métodos para avaliar esses dois tipos de monitoramento podem ser diferentes, mas estes devem estar integrados. Por exemplo, o conhecimento da vazão em tempo de estiagem, aspecto quantitativo, interfere no controle de qualidade do corpo hídrico, pois este fica mais vulnerável à poluição neste período (Righetto, 2009).

O monitoramento quantitativo pode ser feito por meio de medições de chuva por pluviômetros, pluviógrafos e radar meteorológico; por medição de nível com vertedores, régua linimétrica e linígrafos; ou pela medição de velocidade com equipamentos acústicos, radares de medição de velocidade superficial e molinetes.

O monitoramento qualitativo da qualidade da água tem como um de seus objetivos a caracterização da qualidade da água, trazendo a descrição do estado atual do corpo hídrico através de medições das características físicas e avaliação da biota aquática, avaliando também as fontes contaminantes. A análise necessita de uma série temporal longa de amostragens utilizando as mesmas técnicas e procedimentos no monitoramento (Soares, 2001).

Para se escolher as variáveis que serão monitoradas devem-se considerar as características de uso e ocupação do solo da bacia de drenagem, além do próprio objetivo do monitoramento. Cor, turbidez, odor, pH, sólidos totais (ST), sólidos suspensos totais (SST), temperatura, oxigênio dissolvido (OD), carbono orgânico total (COT), nutrientes e metais são alguns exemplos de variáveis que podem ser avaliadas no monitoramento qualitativo (Righetto, 2009).

Alguns estudos que abordaram monitoramento quantitativo e qualitativo em bacias e lagoas de detenção e retenção focaram principalmente em avaliar a eficiência do reservatório na remoção de poluentes da água drenada.

No estudo de Sébastian *et al.* (2014) foram realizados experimentos *in situ* em uma grande bacia de retenção situada em Chassieu, na França, com o objetivo de estimar a eficiência da bacia em aprisionar e remover micropoluentes do escoamento de águas pluviais. As substâncias foram analisadas em 10 eventos de chuva, com amostras coletadas na entrada e na saída, utilizando um amostrador automático refrigerado, monitorando o fluxo com intervalo de tempo de dois minutos, juntamente com o pH da água, condutividade, turbidez e temperatura, por sensores. Para caracterização dos eventos de chuva utilizou-se um pluviômetro. A bacia apresentou boa eficiência para segurar metais pesados, aprisionando de 60% a 70% do níquel, chumbo, cobre e zinco, enquanto os pesticidas estudados não foram capturados, o que é interessante, pois comprova a eficiência dessas estruturas em bacias urbanas.

Sharma *et al.* (2016) investigaram o potencial efeito das mudanças climáticas na qualidade do escoamento de águas pluviais e na eficiência do tratamento de uma lagoa de retenção de águas pluviais na Dinamarca, aplicando um modelo integrado de qualidade de águas pluviais para simular dois cenários: um representando o clima atual e outro representando um cenário climático futuro com maior intensidade de eventos extremos de precipitação. A análise concentrou-se nas cargas totais de sólidos suspensos (SST), e concentrações de cobre (Cu) que chegaram ao reservatório e saíram. Os dados de fluxo de entrada e saída foram coletados usando medidores de vazão com sensores ultrassônicos. Os dados de precipitação foram obtidos a partir de um pluviômetro e as amostras foram coletadas por amostragem proporcional ao volume usando um amostrador automático acoplado ao medidor de vazão. Observou-se que as intensidades de pico extremas resultaram em altas concentrações de partículas e altas cargas, e houve um aumento nas concentrações totais (SST) na saída da lagoa, enquanto nenhum efeito foi observado nas concentrações de cobre dissolvido.

Morse *et al.* (2017) monitoraram durante o um ano a dinâmica do ciclo de nitrogênio (N) de quatro bacias de águas pluviais, sendo duas bacias úmidas (bacias de retenção) e duas secas (bacias de detenção), em Ithaca, Nova York. O volume de fluxo foi determinado com base na precipitação medida no local através de pluviômetros e do método Curva Número do Serviço de Conservação de Recursos Naturais dos EUA (SCS). Amostradores automatizados coletaram amostras de águas pluviais durante a duração da chuva. A análise da qualidade da água incluiu sólidos suspensos totais, nitrito, nitrato e amônia, seguindo as orientações gerais de qualidade da água. Como resultados observaram que as reduções anuais de massa de nitrogênio dissolvido foram maiores na bacia seca do que na úmida; e que a bacia seca filtrou um volume muito maior de água tendo maiores reduções de massa, embora as concentrações de entrada e de saída de nitrogênio fossem estatisticamente iguais para os dois locais.

A utilização de pluviômetros para medição da precipitação é muito difundida, assim como a utilização de amostradores automáticos para obterem-se amostras da qualidade da água, como podem ser observados nos estudos apresentados. A lagoa de detenção apresenta eficiência no aprisionamento de poluentes, porém as lagoas de retenção são mais adequadas para uma maior remoção.

3.5 MODELAGEM COMPUTACIONAL

A gestão das águas pluviais pode se beneficiar de modelos computacionais na fase de planejamento e gerenciamento de um projeto e em casos que se deseja simular cenários sobre o comportamento de um sistema de drenagem submetido a determinadas condições de precipitação pluviométrica. Os modelos computacionais permitem uma análise quantitativa e qualitativa da água, trabalhando, por exemplo, com vazões, volumes e concentração de poluentes (Righetto, 2009).

Há uma grande variedade de modelos computacionais utilizados para drenagem urbana, e a escolha do modelo que será utilizado em um projeto deve levar em consideração sua praticidade, acurácia, dados disponíveis, custo, e um bom domínio do projetista sobre as funcionalidades do modelo. A confiabilidade dos resultados depende da precisão dos dados de entrada, assim precisa-se ter bons dados de entrada para se obter uma melhor resposta. Para que exista essa confiabilidade os modelos devem ser calibrados e validados (Adasa, 2018).

Na drenagem os modelos podem ser hidrológicos e hidráulicos, ou a integração dos dois. Os hidrológicos são capazes de realizar o cálculo de hidrogramas gerados por chuvas críticas, considerando a propagação das ondas de cheias em canais, podendo simular o amortecimento de cheias pela presença de um reservatório. Já os hidráulicos simulam o escoamento em canais em regime transitório, sob pressão atmosférica, podem simular também canais com seções variáveis e com particularidades, além de serem capazes de gerar linhas de inundações sobre bases georreferenciadas e simulam a qualidade da água de acordo com diversos indicadores como, por exemplo, nutrientes (Adasa, 2018).

O modelo *Storm Water Management Model (SWMM)* é um modelo integrado, hidrológico-hidráulico, e este será empregado para a análise quantitativa e qualitativa de uma lagoa de retenção e sua rede de drenagem nesse projeto, sendo apresentado a seguir.

3.5.1 SWMM

O *Storm Water Management Model (Modelo de Gestão de Águas Pluviais - SWMM)* é um programa computacional com grande aplicação para bacias urbanas, desenvolvido em 1970 pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA). Representa um modelo dinâmico de simulação chuva-vazão, que pode ser usado para um único evento ou simulação contínua. É capaz de analisar quantitativamente e qualitativamente a água escoada (GDF, 2009; Righetto, 2009).

O dimensionamento do sistema de drenagem urbana para controle de alagamentos, o mapeamento de áreas inundáveis, a análise da aplicação de estruturas compensatórias, o efeito na qualidade do sistema devido à presença de poluentes, são apenas alguns exemplos de fenômenos que podem ser simulados e analisados pelo SWMM.

O PCSWMM é um programa comercial, desenvolvido pela empresa *Computational Hydraulics International – CHI*, que utiliza uma ferramenta de geoprocessamento integrada ao SWMM, sendo uma interface amplamente adotada em projetos de gestão de águas pluviais (Beling, 2013).

O SWMM atualmente encontra-se na sua quinta versão e representa o comportamento de um sistema de drenagem através de uma série de fluxos de água e matéria entre os principais módulos descritores do ambiente. Esses módulos são divididos em: atmosférico; superfície do solo; transporte; e águas subterrâneas (Rossman, 2015). Na Figura 3.9 é possível ver como esses são esquematizados juntamente com as responsabilidades de cada um.

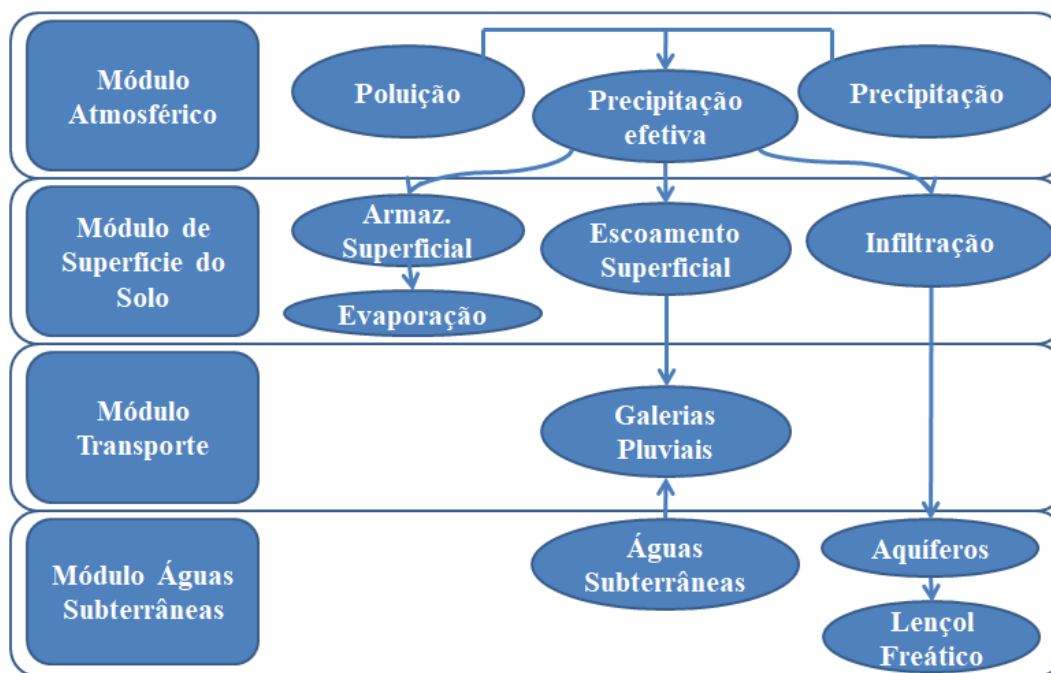


Figura 3.9. Fluxograma dos módulos do SWMM (Adaptado: Souza, 2014).

O modelo SWMM considera diversos processos hidrológicos que ocorrem no ciclo das águas urbanas, como: precipitação variada no tempo, evaporação de águas superficiais não correntes, acumulação e derretimento de neve, interceptação de precipitações por armazenamento em depressões, infiltração das precipitações em camadas de solo não saturadas, aporte de águas infiltradas em aquíferos, intercâmbio de fluxo entre o aquífero e o sistema de drenagem e depósitos não lineares para o fluxo superficial (Rossman, 2015).

Para a simulação no SWMM a área de estudo deve ser dividida em áreas de captação de água pequenas e homogêneas, chamadas de sub-bacias ou bacias de simulação. Cada uma dessas contém frações de áreas permeáveis e impermeáveis. Cada sub-bacia é tratada como um reservatório não linear, onde a sua capacidade corresponde ao valor máximo do armazenamento em depressões. O escoamento ocorre quando a profundidade da água neste reservatório excede o valor máximo de armazenamento em depressões (Rossman, 2015).

O modelo SWMM é baseado em fenômenos físicos que utilizam uma solução discreta no tempo do fenômeno, se baseando nos princípios de conservação de massa, energia e da quantidade de movimento. O escoamento superficial relaciona-se com a vazão que chega (por precipitação ou por bacias a montante), as vazões de saída (infiltração, evaporação), e o armazenamento em depressões. A vazão de saída pelo escoamento superficial é obtida pela equação de Manning. O SWMM permite a utilização de três modelos de infiltração: a equação de Horton (modelo baseado em observações empíricas, onde se propõe que a

infiltração decresce exponencialmente desde um valor inicial máximo até um certo valor mínimo, ao longo do evento de chuva), método Green-Ampt (o método considera a existência de uma franja drenante no solo que separa o solo com um determinado conteúdo inicial de umidade do solo completamente saturado na parte superior) e método Curva Número do SCS (assume que a capacidade total de infiltração de um solo pode ser extraída de uma tabela curva número, onde durante um evento de chuva esta capacidade é representada como uma função da chuva acumulada e da capacidade de infiltração restante) (Rossman, 2015).

Os modelos hidráulicos de transporte presentes no SWMM são: escoamento uniforme, modelo de onda cinemática e modelo da onda dinâmica. O modelo da onda dinâmica utiliza todas as equações de Saint Venant, gerando resultados mais precisos. Essas equações representam a aplicação da equação da continuidade e da quantidade de movimento nos condutos e da continuidade dos volumes nos nós. Esse modelo contempla os efeitos de ressalto hidráulico, perdas nas entradas e saídas dos poços de visita, efeitos de remanso, ou escoamento sob pressão. Pode ser usado para qualquer tipo de configuração de rede, incluindo casos que contenham nós com múltiplos divisores de escoamento para jusante do mesmo. Trata-se do método adequado para os sistemas em que há efeitos de ressalto hidráulico, originados pelas restrições do escoamento para jusante e pela presença de elementos de controle, tais como orifícios e vertedores (Rossman, 2015).

Para análise de qualidade da água são utilizadas informações como o uso e ocupação do solo, e dos poluentes de interesse para análise. O SWMM é capaz de simular sólidos em suspensão, metais, coliformes, matéria orgânica e inorgânica, avaliando a DBO e DQO, além de nutrientes (nitrogênio e fósforo), entre outros (Beling, 2013).

Vários estudos são realizados pelo mundo utilizando o modelo SWMM em seus projetos, tanto para análises quantitativas como qualitativas.

Niazi *et al.* (2017) realizaram uma revisão de estudos referentes ao uso do SWMM a fim de fornecer uma avaliação quantitativa do desempenho do modelo para diferentes aplicações. Estudos sobre o uso de SWMM para análise de inundações foram publicados durante o período de 1987 a 2014, mas a maioria foi publicada desde 2013 com o crescente interesse nos efeitos das mudanças climáticas (Dasgupta *et al.*, 2013; Gersonius *et al.*, 2013; Kirshen *et al.*, 2014). O SWMM é capaz de produzir mapas de inundação, facilita a determinação das áreas com maior risco e dos pontos fracos nas redes de esgoto (Banks *et al.*, 2014; Fu *et al.*, 2011; Gersonius *et al.*, 2013, Huong e Pathirana, 2013).

Park *et al.* (2012) utilizaram o modelo SWMM para analisar o projeto uma lagoa de retenção com múltiplos usos na cidade Ulsan, na Coreia do Sul. O distrito de Ulsan-Hwabong foi dividido em dez sub-bacias para análise com o SWMM, e uma destas foi selecionada para o estudo. O modelo onda dinâmica foi selecionado para representar as condições reais de fluxo, e o modelo de Horton foi selecionado para simulação de infiltração, e utilizou-se o método de distribuição de chuvas SCS. Por fim, a simulação apresentou viabilidade de implantar uma lagoa de retenção com mais de um uso, como recreação e estacionamento.

Vários constituintes da qualidade da água foram investigados usando SWMM, como sólidos suspensos totais (SST) (Borris *et al.*, 2014; Chang *et al.*, 2008; Chow *et al.*, 2012), compostos de nitrogênio (Chang *et al.*, 2008; Jia *et al.*, 2014), metais pesados (Borris *et al.*, 2014; Fallah Shorshani *et al.*, 2014), oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) (Kirshen *et al.*, 2014), e fósforo (Chow *et al.*, 2012; Jia *et al.*, 2014). Com o módulo de qualidade da água do SWMM consegue-se determinar os efeitos da poluição não pontual (Jia *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2010; Oraei Zare *et al.*, 2012); verificar interações da qualidade do ar (Fallah Shorshani *et al.*, 2014); verificar os efeitos de mudança de clima e uso da terra (Borris *et al.*, 2014) e ver os efeitos da primeira chuva (Chang *et al.*, 2008; Ouyang *et al.*, 2012; Young *et al.*, 2010).

Na maioria dos estudos analisados por Niazi *et al.* (2017) a calibração do SWMM foi executada manualmente, alterando um parâmetro por vez e comparando as previsões do SWMM com as observações. Este método de tentativa e erro tem sido amplamente utilizado por pesquisadores (Blumensaat *et al.*, 2012; Chung *et al.*, 2011; Gülbaz e Kazezyilmaz-Alhan, 2013; Walsh *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2013). A abordagem de calibração baseada em eventos é mais popular na literatura em comparação com a calibração contínua. Os estudos também mostram que o desempenho de validação do SWMM é frequentemente mais fraco do que o desempenho da calibração, indicando uma confiança menor para a capacidade de extrapolação do modelo.

No âmbito do Distrito Federal, Souza (2014) avaliou o comportamento quantitativo e qualitativo 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. Utilizou o SWMM para modelagem matemática, obtendo bons resultados para modelagem de vazão, porém, nas simulações de qualidade, observou-se uma resposta menos eficiente do modelo. Avaliou também a implantação de lagoas de retenção para estudar os efeitos de sua localização na remoção de poluentes, bem com o dimensionamento de seu volume de armazenamento.

Concluiu que as lagoas a jusante da rede são as mais eficientes, porém requerem uma área de construção em geral em áreas ambientalmente problemáticas e/ou de alto valor comercial. Portanto, alternativas com volumes menores em áreas mais centrais na lagoa podem atender às necessidades de amortecimento das cheias.

O estudo de Volken (2018), realizado na mesma área de estudo deste projeto, utilizou o modelo SWMM para a análise da rede de drenagem e o comportamento da lagoa de retenção do Guará II, Distrito Federal, frente a diferentes eventos de chuvas de projeto constantes e variáveis no tempo. Pelas simulações verificou que a rede de drenagem possui pontos de alagamentos e que a vazão de escoamento é muito elevada, constatando a necessidade da lagoa de retenção. As simulações indicaram que a lagoa é muito grande para as vazões, e considerando como vazão efluente as vazões de pré-desenvolvimento estabelecida pela Resolução nº 9 de 2011 da Adasa (Vazão máxima de 24,4 L/s.ha) a lagoa teria capacidade de amortecer cheias geradas por chuvas com período de retorno de 290 anos.

4. METODOLOGIA

A metodologia do projeto consistiu no levantamento de dados por monitoramento quantitativo e qualitativo em eventos de precipitação para verificar o comportamento da lagoa de retenção situada no Guará II e sua rede de contribuição. Para as simulações hidráulico-hidrológicas e de qualidade da água foi utilizado o modelo SWMM. A Figura 4.1 apresenta o fluxograma que traz os procedimentos que foram seguidos para alcançar os objetivos do estudo.

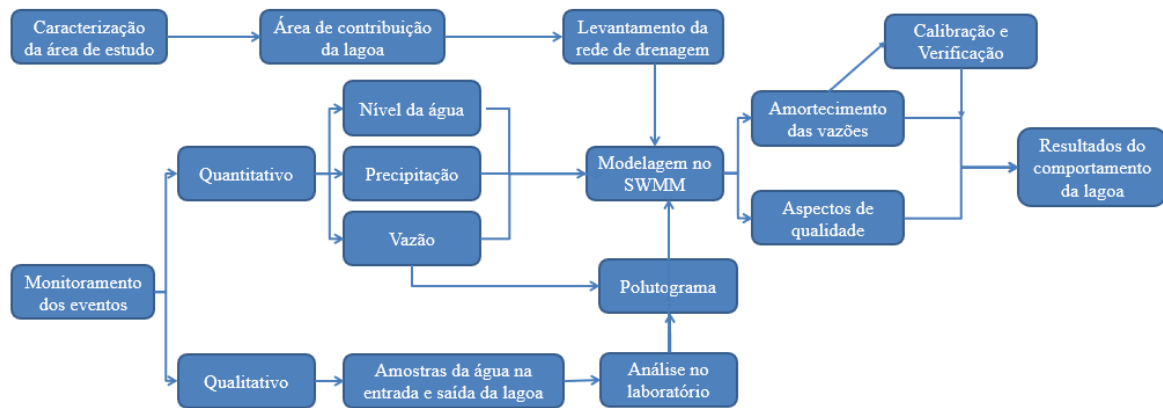


Figura 4.1. Fluxograma da metodologia.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1.1 Clima e Solo

O clima do Distrito Federal é tropical, marcado por dois períodos bem distintos, um chuvoso e um seco. O período de precipitação é concentrado no verão, marcado pelos meses de outubro a abril (Figura 4.2). Novembro, dezembro, janeiro e fevereiro são, na média, os meses mais chuvosos em todos os postos localizados no DF, concentrando 47% da precipitação anual. Já o período entre maio e setembro é marcado pela baixa precipitação, alta taxa de evaporação e umidades relativas diárias muito baixas. Há variações na temperatura por conta de diferenças altimétricas, trazendo três tipos climáticos com temperaturas em média variando entre 18 a 22° C de acordo com a classificação de Köppen, porém não há variações significativas de precipitação dentro do DF. A precipitação média anual é da ordem de 1500 mm (Campos, 2004; GDF, 2009).

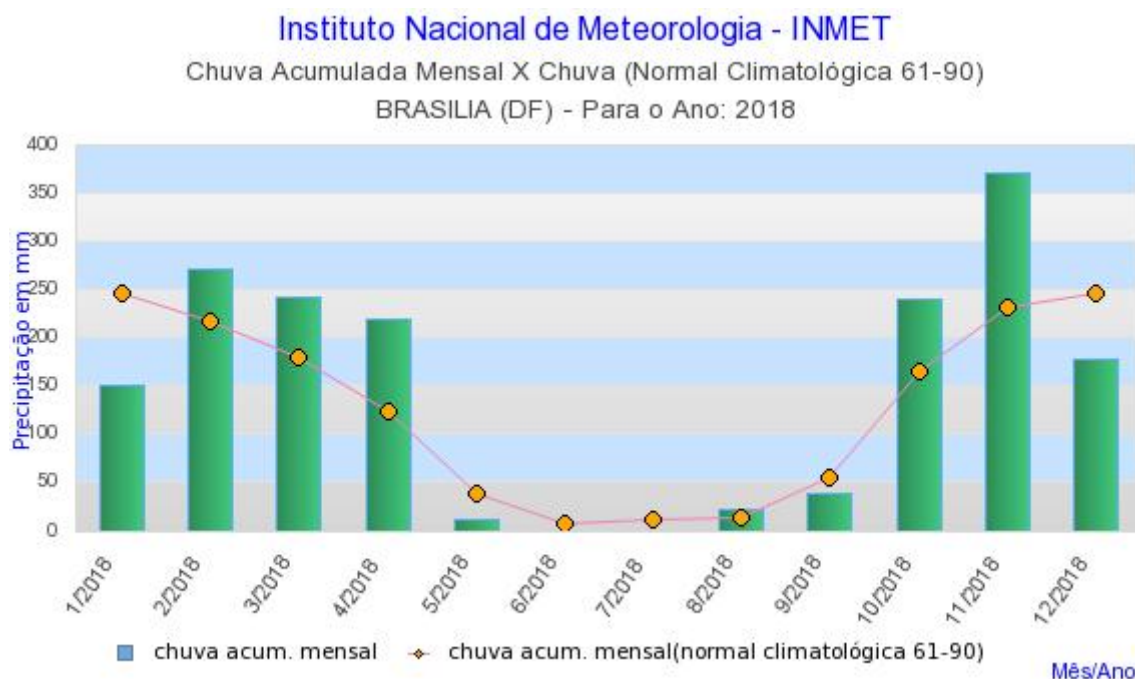


Figura 4.2. Precipitação acumulada mensal em Brasília, no ano de 2018 (INMET, 2019).

O solo do DF é caracterizado por três classes principais, os Latossolos (ocupam cerca de 50% da área), os Cambissolos (representam 30% da área) e os solos hidromórficos. Os Latossolos são solos profundos, de até 20 metros de espessura, e possuem capacidade moderada de infiltração e elevada porosidade, favorecendo a recarga de aquíferos. Podem ser diferenciados em Latossolos Vermelhos e Latossolos Vermelhos-Amarelos. A bacia Riacho Fundo apresenta cinco tipos de solo, onde o solo predominante é o Latossolo Vermelho que ocupa 38% da área, inclusive a área ocupada pela área de contribuição e pela lagoa de retenção em estudo (GDF, 2009; Adasa, 2018).

A identificação do tipo de solo presente na região é fundamental para a escolha adequada dos valores a serem adotados para o parâmetro de Curva Número (CN) do método *Soil Conservation Service* (SCS) para identificação da capacidade de escoamento superficial de um terreno levando em consideração também sua cobertura. Segundo Tucci (1995) o Latossolo Vermelho é considerado pertencente à classificação do Grupo A, que apesar de elevada concentração de argila apresenta características de solo arenoso.

4.1.2 Bacia hidrográfica

A lagoa de retenção está situada na unidade hidrográfica do Riacho Fundo, bacia de contribuição do Lago Paranoá, que é uma região caracterizada como uma das maiores concentrações urbanas do DF. Os córregos Vicente Pires, Riacho Fundo e Guará são os

principais cursos d'água dessa unidade (GDF, 2009). A rede de drenagem da lagoa de retenção encontra-se entre as sub-bacias hidrográficas do Riacho Fundo e do Lago Paranoá (Figura 4.3).

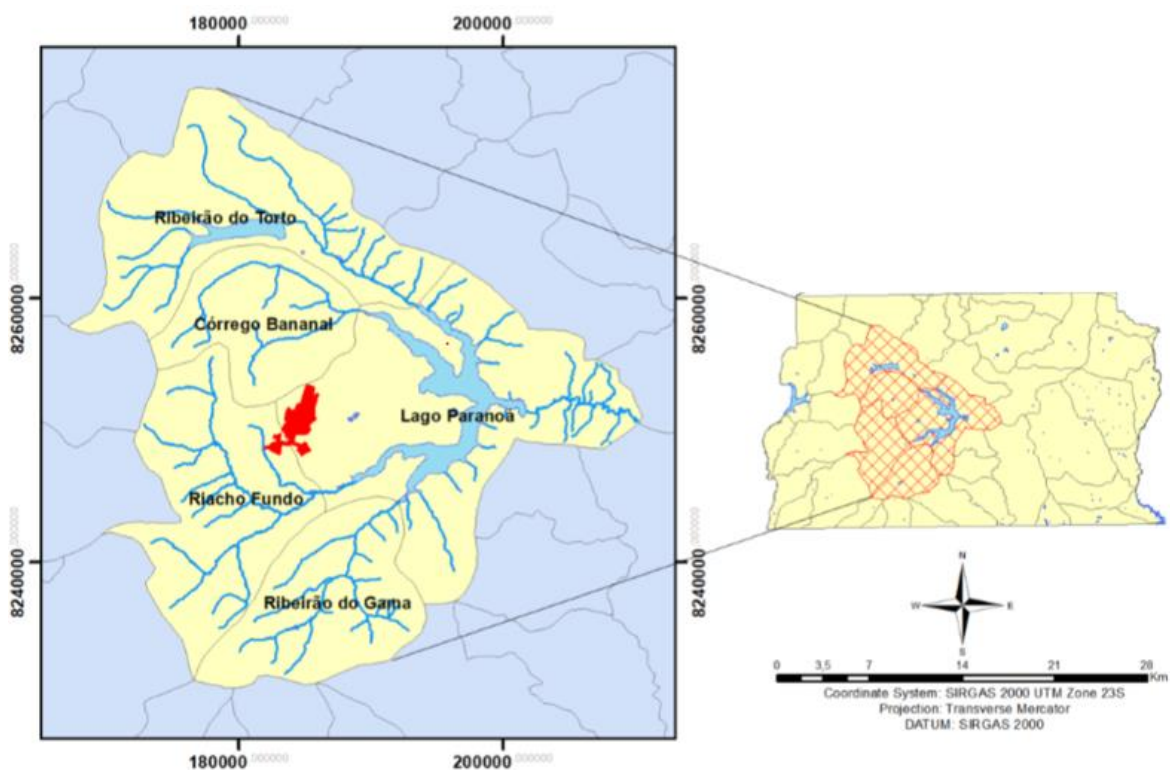


Figura 4.3. Localização da área de estudo em relação às bacias hidrográficas do DF.

4.1.3 Lagoa de retenção

A lagoa de retenção em estudo está contida no Parque Ecológico Ezequias Heringer, no Setor de Oficinas Sul – SOF Sul, na região administrativa do Guará, Distrito Federal. A lagoa drena uma área total de 7,4 km² (Volken, 2018), recebendo o lançamento final da drenagem de águas pluviais de algumas áreas totalmente urbanizadas, como: Cruzeiro Velho, Cruzeiro Novo, Octogonal, Instituto Nacional de Meteorologia, parte do Setor Sudoeste, Hospital das Forças Armadas, Setor de Indústria e Abastecimento (SIA), Subestação de Furnas e o Setor Policial Sul e parte do Setor de Oficinas Sul (ArKis, 2005).

Até 1993, a área abrigava lagoas de estabilização da CAESB que tratavam o esgoto das áreas próximas, mas, nesse mesmo ano, com a reforma da Estação de Tratamento de Esgoto Brasília Sul, essas lagoas foram desativadas. Em 2009, a lagoa de retenção foi implantada nesse local com o objetivo de amortizar o pico de vazão máxima do escoamento superficial das áreas já citadas, e para reter partículas sólidas presentes nos efluentes, melhorando sua qualidade (ArKis, 2005).

A área da lagoa de retenção é de, aproximadamente, 25,5 ha, e antes da sua implementação toda a área foi nivelada, com cotas iniciais de 1079 m como cota de fundo e cota da crista de 1081 m (ArKis, 2005). A entrada da água pluvial escoada na lagoa de retenção ocorre por uma galeria de lançamento formada por três câmaras retangulares paralelas, com 2,7 x 2,5 de seção. A estrutura de saída contém dois estágios, com um vertedor de 20 m de comprimento e cota de soleira a dois metros do fundo e uma descarga de fundo formada por um tubo com 1 m de diâmetro com comprimento de 2,25 m. O córrego Guará recebe o lançamento da lagoa de retenção por uma tubulação de 1,5 m de diâmetro. Segundo o enquadramento dos corpos hídricos pelos seus usos preponderantes, o córrego Guará está enquadrado na classe II. A Figura 4.4 apresenta a área da lagoa e suas estruturas.



Figura 4.4. Lagoa de retenção do Guará com estruturas de entrada e saída.

A galeria de entrada da lagoa de retenção apresenta-se sempre alagada, e em várias visitas na lagoa em estudo observou-se que há muito resíduos sólidos nessa área e o lançamento também está poluído com esgoto e óleo, a Figura 4.5 a) e b) ilustra essas situações. Durante as visitas notou-se também entulhos e lixos nas áreas ao redor da lagoa (Figura 4.5 c). Em algumas saídas de campo observou-se que havia menos volume de lixo e entulho, significando que há algum órgão recolhendo esse descarte irregular, porém em pouco tempo o estado volta a ser crítico, como diversas vezes presenciaramu-se cidadãos descartando todo tipo de material e lixo nessa área.



Figura 4.5. Poluição presente na área de estudo: a) entrada da galeria com água marrom e pastosa; b) acúmulo de lixo no lançamento da galeria; c) entulhos e lixo ao redor da lagoa.

Na primeira visita à lagoa em estudo, realizada no dia 22 de setembro de 2018, observaram-se algumas acumulações de água espalhadas pela lagoa, porém o orifício de saída não apresentava nenhuma vazão. Na segunda visita, realizada no dia 10 de outubro de 2018, com grande precipitação nos dias anteriores, foi possível verificar uma maior acumulação de água na lagoa, e havia certa vazão na estrutura de saída. Em outra visita realizada no dia 16 de novembro de 2018, a lagoa apresentava-se com muito mais água acumulada com a régua da saída marcando 75 centímetros, gerando uma grande vazão de saída (Figura 4.6).



Figura 4.6. a) área dentro da lagoa de retenção na primeira visita; b) área dentro da lagoa na segunda visita; c) Orifício de saída na segunda visita; d) área dentro da lagoa no dia 16/11/2018; e) Orifício de saída no dia 16/11/2018.

4.1.4 Área de drenagem da lagoa de retenção

A área de drenagem da lagoa de retenção é totalmente urbanizada e sua rede é composta por poços de visita (PV), coletores e galeria (Figura 4.7). Volken (2018) realizou o levantamento dessa rede por meio de plantas baixas do Departamento de Águas Pluviais que foram disponibilizadas pela NOVACAP. Para os poços de visita foram utilizados os dados referentes à cota da tampa, a cota de entrada da água e à cota de saída. Para os condutos e galeria final os dados utilizados foram o diâmetro dos condutos e a seção das galerias.

Para os PVs que não apresentavam todos os dados necessários Volken (2018) adotou a cota de entrada da água como sendo igual à cota da tampa, onde considerou a cota da tampa como sendo a cota do terreno que foi obtida através de um Modelo Digital de Elevação (MDE). A cota de saída foi padronizada como sendo dois metros abaixo da cota da tampa.

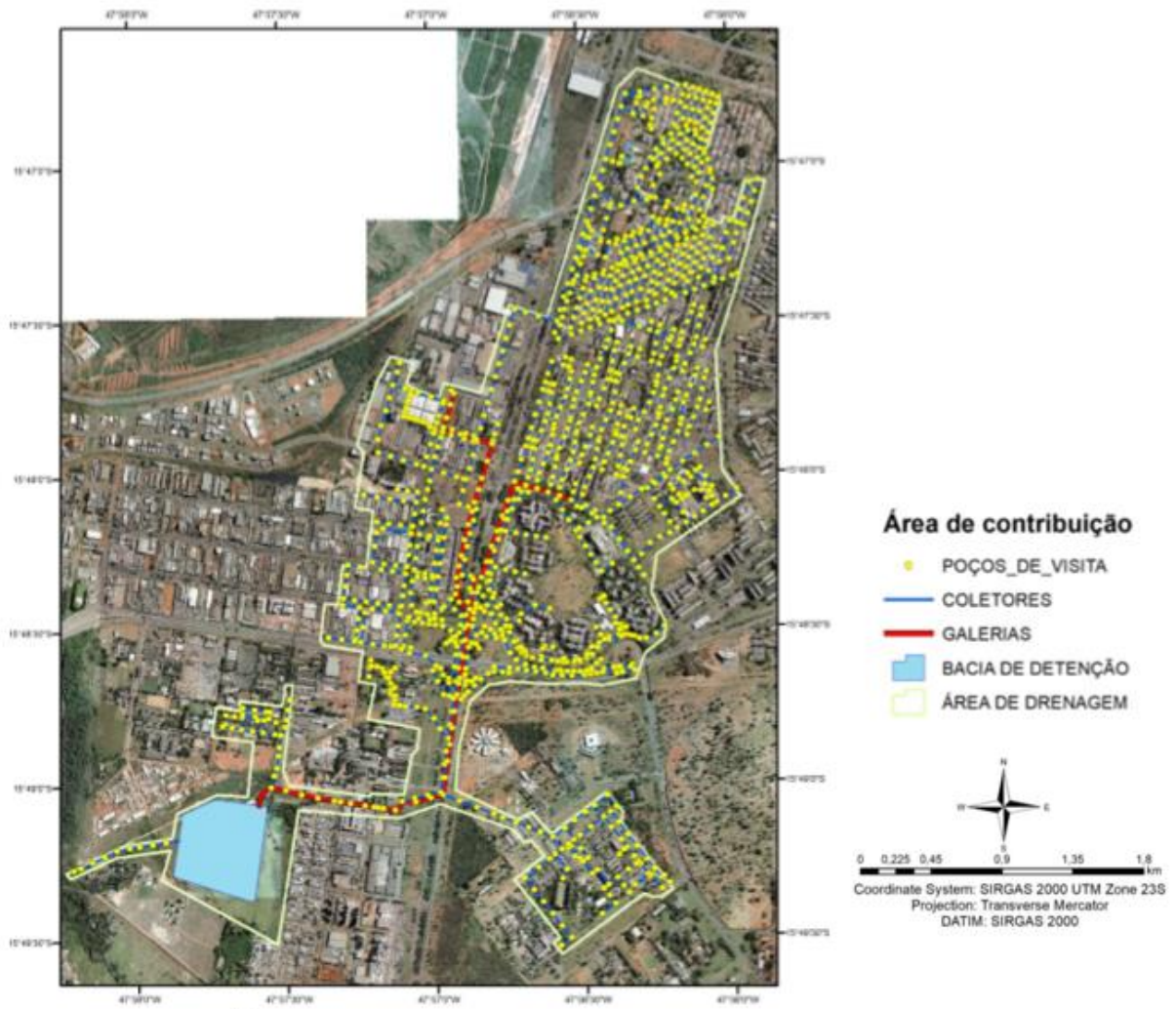


Figura 4.7. Área de contribuição da drenagem para a lagoa de detenção (Volken, 2018).

4.1.5 Uso e ocupação do solo

O uso e ocupação do solo, assim como o tipo de solo, é um parâmetro para a identificação do CN para caracterização do escoamento superficial da água que ocorrerá. O mapa de uso e ocupação do solo da lagoa em estudo foi realizado no trabalho de Volken (2018) e esse foi utilizado como base para as simulações no SWMM. Foram identificados sete tipos de uso e ocupação diferentes, conforme pode ser visto na Figura 4.8.

Os valores adotados para cada CN de acordo com as classes de uso e ocupação do solo seguiram o recomendado por Tucci (1995) e estão resumidos na tabela 4.1.

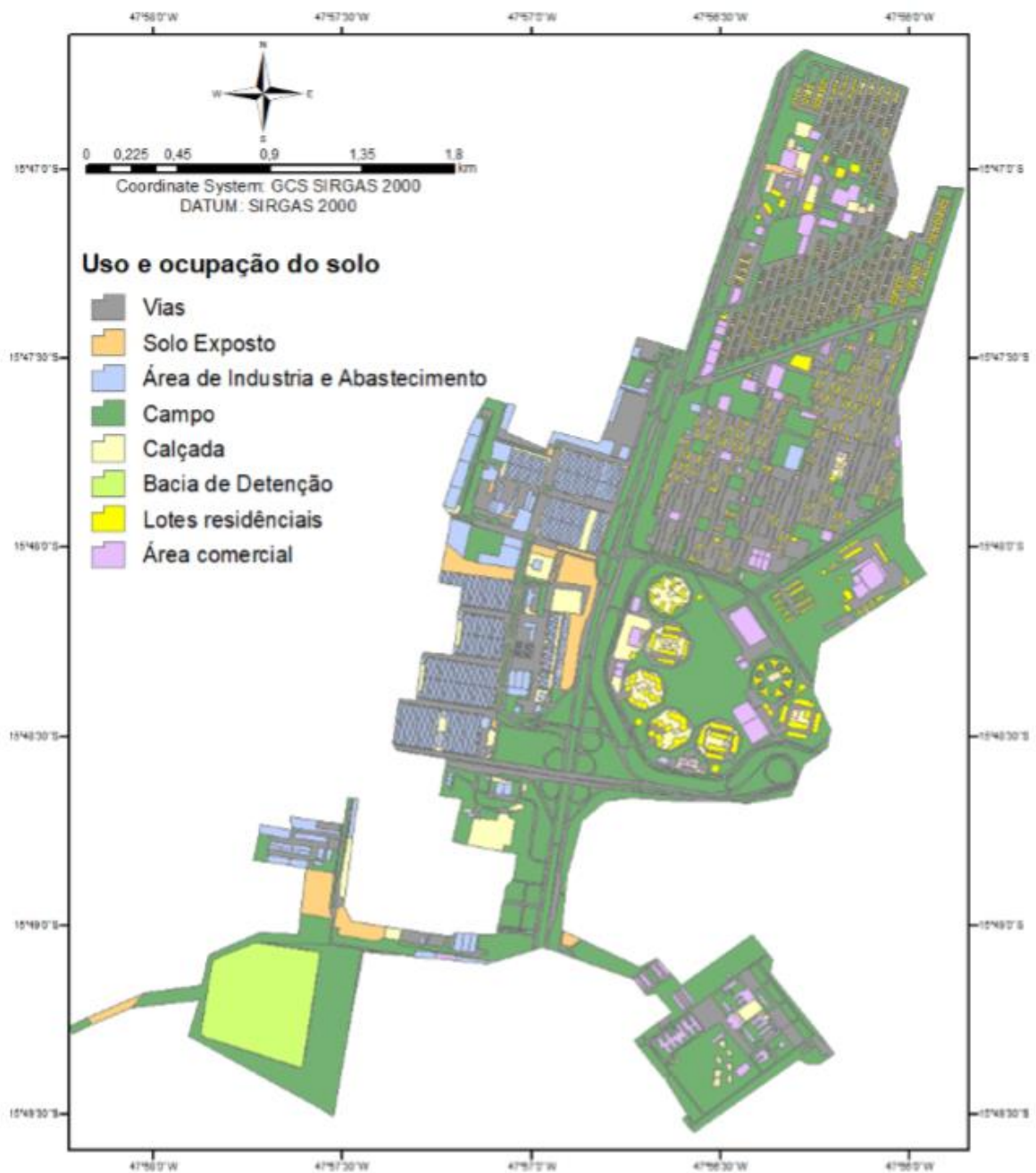


Figura 4.8. Mapa de uso e ocupação do solo (Volken, 2018).

Tabela 4.1. Classes de uso e ocupação da área de contribuição da rede de drenagem da lagoa de detenção (Volken, 2018; Tucci, 1995 modificado).

Nome	Descrição do uso do solo	CN
Vias	Arruamentos e estradas asfaltadas com rede de drenagem pluvial.	98
Área Comercial	Área comercial com 85% ou mais de área impermeável.	89
Área Industrial	Área industrial com 72% ou mais de área impermeável.	81
Campo	Espaços abertos: matos ou gramas cobrem 75% ou mais da área.	39
Solo Exposto	Solo exposto, com terra aparente.	72

Calçada	Calçadas e paralelepípedos.	76
Lagoa de retenção	Considerado que o fundo da lagoa é de argila compactada, de modo a possuir alto nível de impermeabilização.	98
Lotes residenciais	Tamanho do lote: < 500 m ²	77
	Tamanho do lote: 1000 m ²	61
	Tamanho do lote: 1300 m ²	57
	Tamanho do lote: 2000 m ²	54
	Tamanho do lote: 4000 m ²	51

A classe campo, a qual engloba partes do cerrado e áreas de canteiros centrais, é a que apresenta maior área, e as classificadas como solo exposto apresentam a menor área. A soma da porcentagem de vias, lotes residenciais, áreas industriais, comércio e calçadas, resulta em 62,4%, o que comprova que a maior parte da área da rede possui característica de áreas urbanizadas (Volken, 2018).

4.2 MONITORAMENTO

Para atingir os objetivos do trabalho foi realizado o levantamento em campo de dados quantitativos e qualitativos referentes à lagoa de retenção em estudo, através do monitoramento de eventos durante o ano de 2018 e de 2019. Esse levantamento é necessário, por conta da carência ou inexistência de dados hidrológicos de boa qualidade, para se conseguir analisar e entender o sistema de drenagem.

Os principais dados quantitativos envolvem os valores das precipitações ocorridas na área de estudo e as vazões geradas nos eventos chuvosos. Já os dados de qualidade foram obtidos por meio de coleta com um amostrador automático, e analisaram-se as amostras no laboratório.

4.2.1 Banco de Dados

No estudo de De Paula (2018) foram instalados em campo alguns instrumentos para o monitoramento da lagoa de retenção do Guará, que foram utilizados nesse projeto. Na entrada da lagoa foram instalados: um linígrafo de boia da marca *OTT*, modelo Tallimedes; uma régua linimétrica; e um amostrador automático ISCO 6712. Na saída da lagoa há um linígrafo de boia e um de pressão, um amostrador automático ISCO 6712 e duas réguas linimétricas (Figura 4.9).



Figura 4.9. Linígrafo de boia e régua instalados na saída da lagoa (foto da esquerda), detalhes do linígrafo (foto da direita).

Além disso, foram instalados cinco pluviógrafos em campo, um deles localizado bem próximo da lagoa de retenção (dentro do Parque Ezechias Heringer), e os outros em áreas de contribuição da lagoa, no Cruzeiro Velho (Figura 4.10), no Cruzeiro Novo, no Octogonal e um no SIA, conforme identificado no mapa da Figura 4.11. Os pluviógrafos são do tipo balsa da *Onset* e foram acoplados a uma placa de concreto para fornecer estabilidade ao aparelho.



Figura 4.10. Pluviógrafo instalado no telhado do Centro Comercial em Cruzeiro Velho.

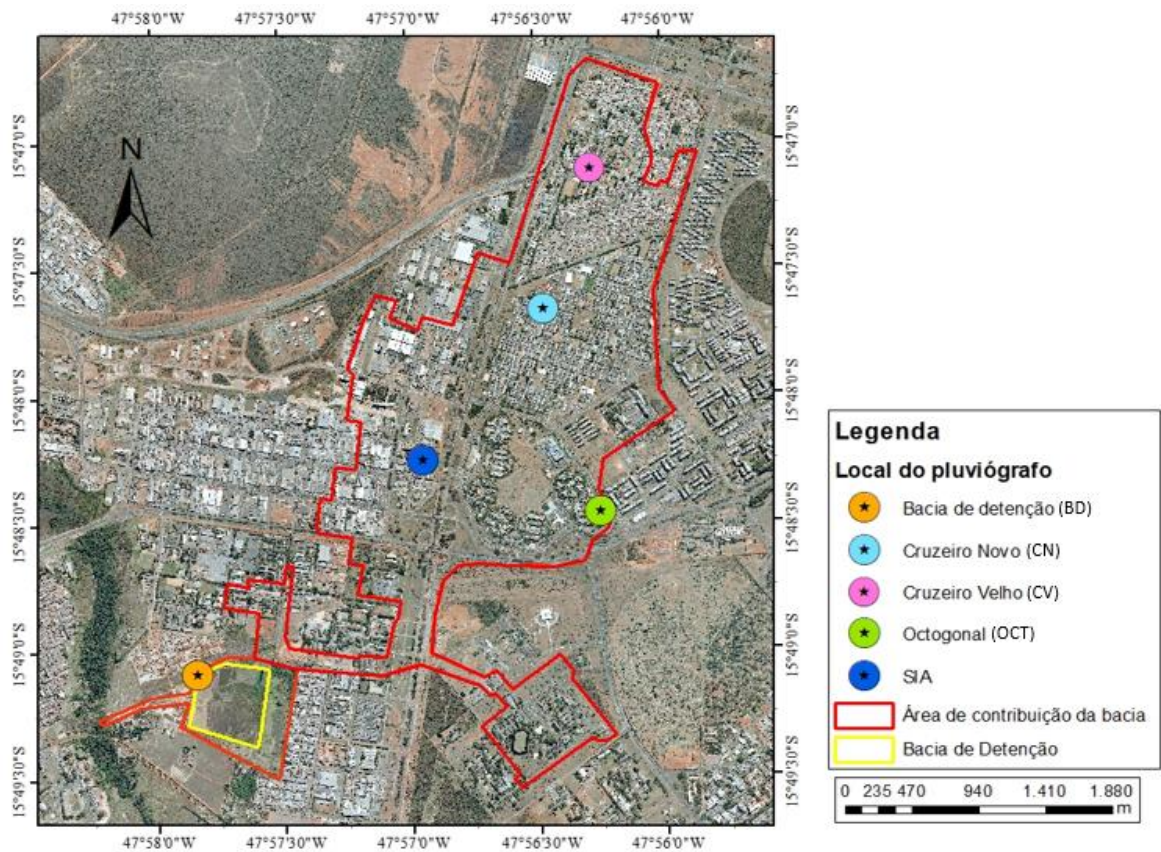


Figura 4.11. Localização dos pluviógrafos instalados.

Dados referentes à rede de drenagem foram levantados no estudo de Volken (2018) a partir de plantas disponibilizadas pela NOVACAP, que é detentora do cadastro da macrodrenagem no DF.

4.2.2 Monitoramento quantitativo

O monitoramento quantitativo consistiu em coletar dados dos eventos. Durante o período chuvoso do DF foram monitorados dados de precipitação, de nível e de vazão, sendo que esses dois últimos foram obtidos tanto para a entrada como para a saída da lagoa de detenção.

As medições de precipitação foram obtidas por cinco pluviógrafos instalados na lagoa de detenção e na sua área de contribuição, de novembro de 2018 até maio de 2019. As áreas de influência desses equipamentos foram determinadas pelo método dos polígonos de Thiessen (Figura 4.12), para que os dados de precipitação obtidos por cada pluviógrafo fossem inseridos nas sub-bacias de contribuição referente à sua localização para as simulações no SWMM. Em média, a cada 20 dias realizava-se uma saída de campo para os locais de instalação dos pluviógrafos para baixar os dados registrados e trocar a pilha do equipamento. O pluviógrafo registra o momento em que houve o acionamento da balança pelo gotejamento da chuva, com resolução de 0,2 mm para lâmina de chuva.

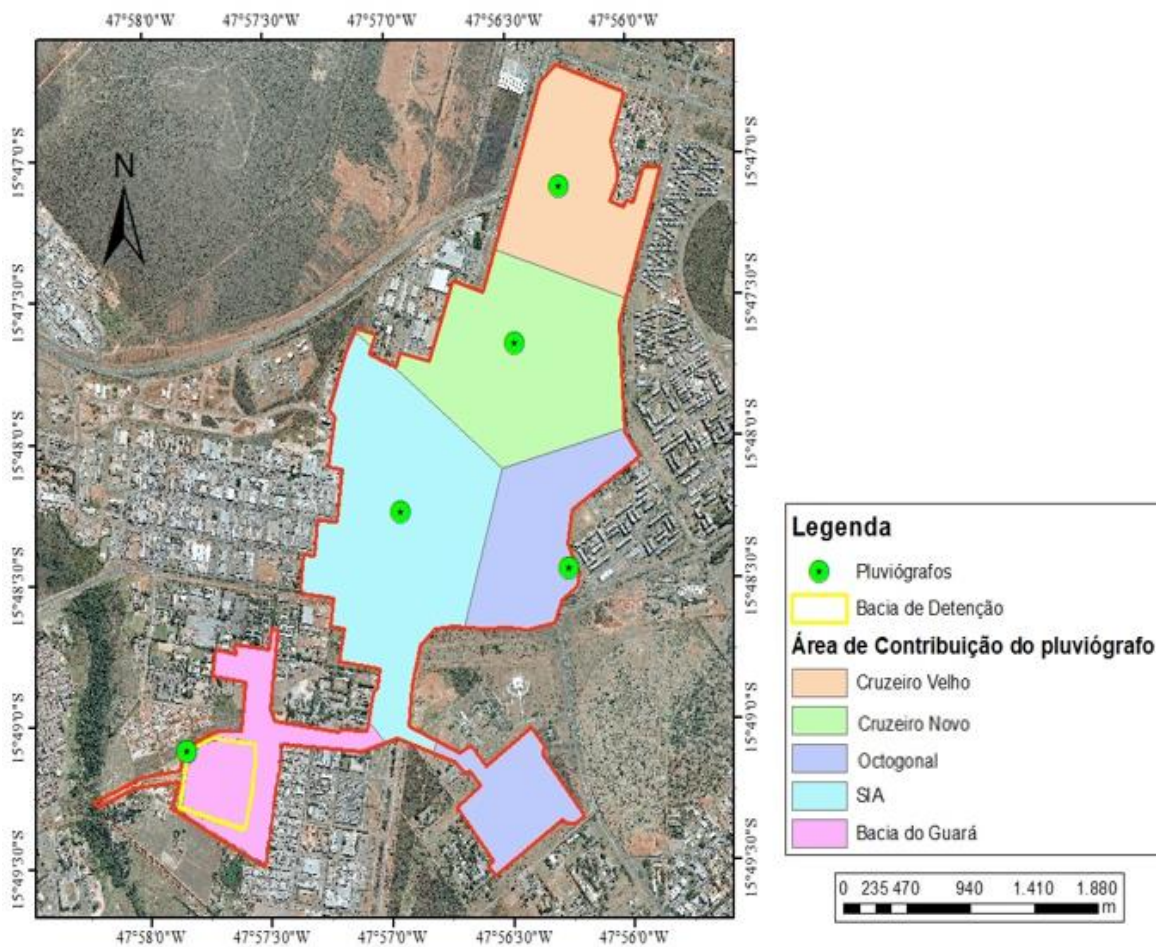


Figura 4.12. Distribuição da área de contribuição por pluviômetro.

A medição do nível da água foi feita na entrada da lagoa de retenção por uma régua linimétrica e por um linígrafo de boia da marca *OTT* modelo Thalimedes, que registra o nível com precisão de 0,001 m. A régua apenas foi usada para conferência com os dados registrados pelo linígrafo e durante as medições de vazão. Na saída da lagoa foi instalado um linígrafo de pressão ao lado do vertedor, e um linígrafo de boia ao lado do orifício de fundo. Ambos registravam o nível em intervalos de 5 minutos. Durante as visitas de campo eram baixados os dados registrados pelos equipamentos e verificada a necessidade de trocar a bateria. Os níveis foram monitorados pelo mesmo período que os pluviômetros.

Para determinar as vazões de entrada e saída da lagoa foram utilizados os dados de nível e a curva-chave de cada seção. Com a curva-chave não são necessárias medições contínuas das descargas, sendo suficientes as medições contínuas das cotas para obter-se a série de dados de vazão. Para desenvolver a curva-chave para uma determinada seção é necessário que sejam feitas medidas de vazão em diferentes níveis d'água, para que se obtenha a curva dessa relação a partir da interpolação dos dados.

Assim, para a determinação das curvas-chave, para a entrada e para a saída da lagoa, as vazões foram medidas utilizando um equipamento medidor de velocidade por efeito *doppler*, o ADC Profiler (*Accoustic Doppler Current*) da marca OTT (Figura 4.13). O ADC tem capacidade de identificar velocidades entre 0,2 m/s e 2,4 m/s, com precisão média de 0,0025 m/s.



Figura 4.13. Equipamento ADC.

Na entrada da lagoa, na galeria, as medições utilizando o ADC foram feitas apenas na vertical do meio de cada câmara para o momento antes e durante a passagem da onda de cheia. Quando o nível se estabilizava as medições eram realizadas em 3 verticais espaçadas igualmente em 0,6 metros, em cada uma das três câmaras da galeria. Essas medições foram feitas em dois eventos de precipitação.

O ADC mede a velocidade e, então, para transformar esse dado em vazão, para o caso das galerias, multiplicou-se a velocidade média na vertical pela área da galeria (altura da água vezes a largura de cada câmara da galeria, que é de 2,7 m, mas para compensar o efeito da borda subtraiu-se 5 cm de cada lado, resultando em 2,6 m de largura por galeria).

Com os dados de vazão e os níveis medidos, obteve-se a curva-chave (Figura 4.14) para a entrada da lagoa, expressa pela Equação 4.1.

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

Em que:

Q - vazão em m³/s; e

H - altura da lâmina da água em m

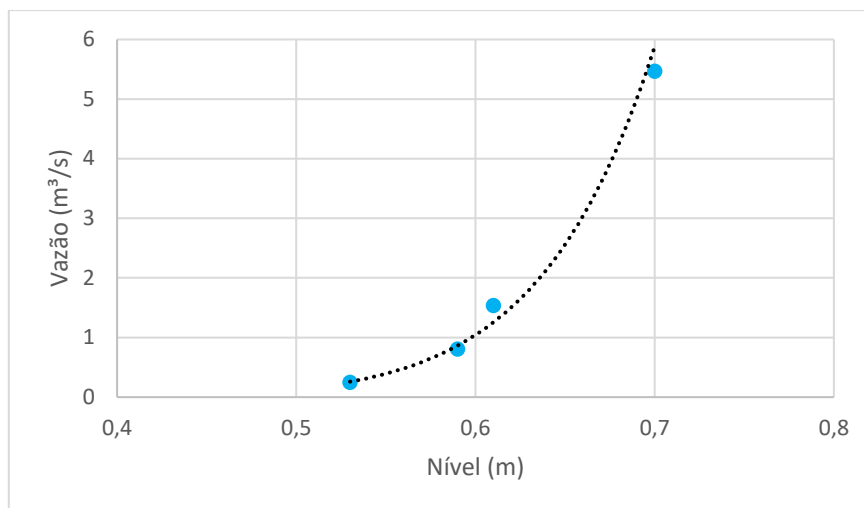


Figura 4.14. Curva-chave obtida para a entrada da lagoa de retenção.

Na saída da lagoa de retenção as medições utilizando o ADC foram feitas ao final da descarga de fundo (Figura 4.15) em 7 verticais espaçadas em 0,125 metros. Pelo nível ser mais estável na saída foi possível medir em várias profundidades, 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 de profundidade. Foi possível realizar essas medições em diversas visitas de campo quando se verificava que o nível estava diferente daqueles para os quais a vazão já havia sido levantada.

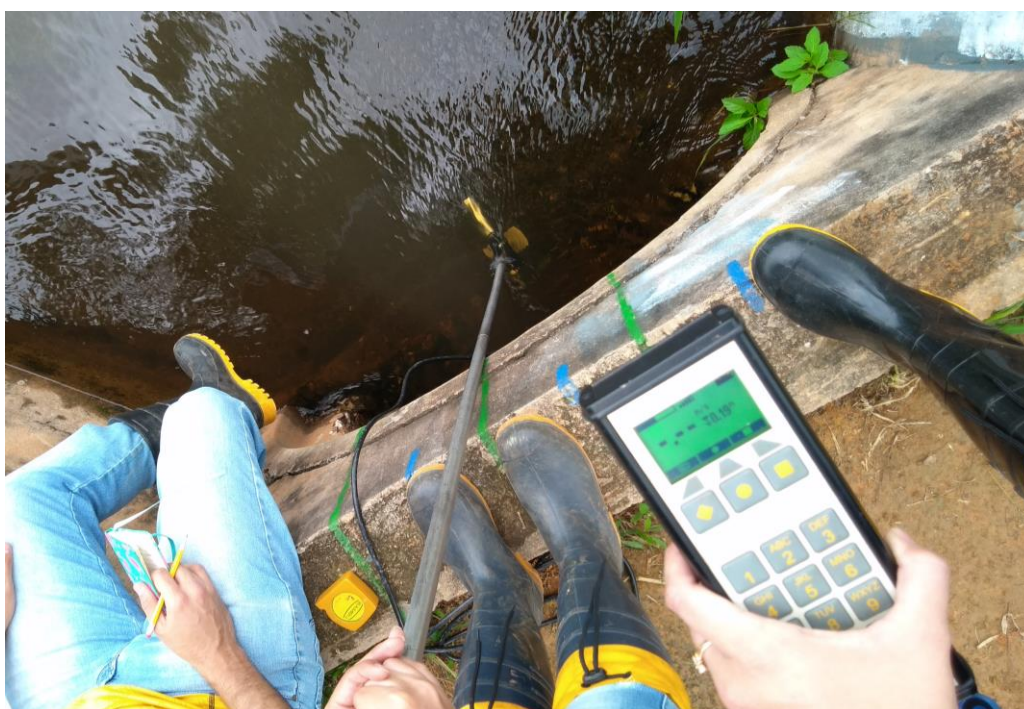


Figura 4.15. Medição de vazão na saída da lagoa, na descarga de fundo, com o ADC.

Calculou-se a velocidade média para cada vertical levando em consideração o perfil e multiplicou-se a velocidade média de cada vertical. Assim a vazão total é a soma das vazões parciais em cada uma das verticais, para cada cota.

Com as medições foi possível montar a curva-chave para a saída da lagoa (Figura 4.16), expressa pela Equação 4.2.

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

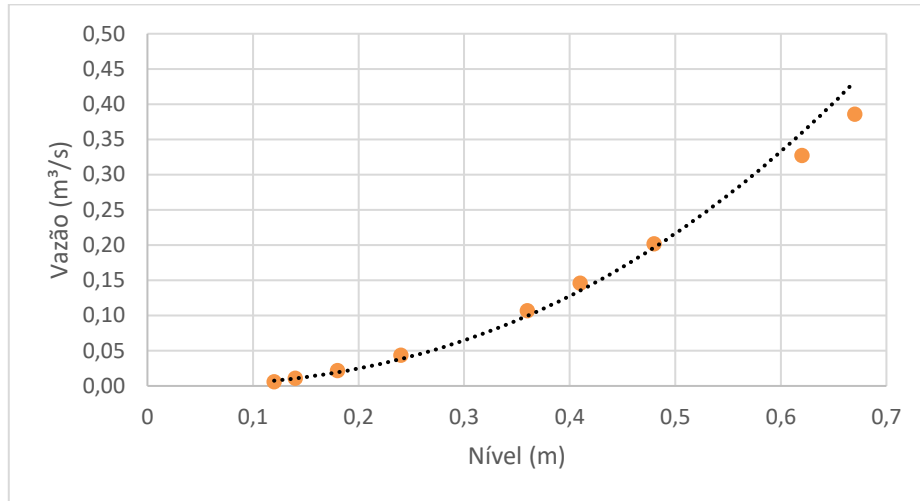


Figura 4.16. Curva-chave obtida para a saída da lagoa de retenção.

4.2.3 Monitoramento qualitativo

No monitoramento qualitativo foram realizadas análises, *in loco* e em laboratório, para avaliar a capacidade da lagoa de retenção na remoção dos poluentes presentes na água drenada. A coleta das amostras de água foi realizada tanto na entrada como na saída da lagoa de retenção com o auxílio de amostradores automáticos.

O amostrador automático (Figura 4.17) permite a coleta de até 24 amostras de água com volume pré-estabelecido. O início das coletas e o intervalo entre as coletas também são pré-definidos. As coletas iniciam quando o nível da água atinge uma determinada cota, quando o aparelho é acionado a partir de um sensor de nível.

O amostrador possui uma mangueira acoplada que recolhe a amostra. Na entrada da lagoa, na galeria, a mangueira foi instalada inicialmente na câmara 3, e as amostras, a partir de fevereiro, foram coletadas na câmara 2. A Figura 4.18 mostra onde estava localizado o amostrador, onde foi construída uma caixa de concreto para mantê-lo dentro para proteção, e a identificação das câmaras da galeria. A entrada da lagoa encontra-se sempre alagada, mantendo uma cota mínima de 0,39 metros, assim o amostrador foi ajustado para iniciar a coleta na entrada da lagoa quando o nível da lâmina da água atingisse 0,60 m, recolhendo as amostras durante a passagem de ondas de cheia.



Figura 4.17. Amostrador ISCO aberto.



Figura 4.18. Entrada da lagoa de detenção, identificando as câmaras da galeria e o amostrador.

Na saída da lagoa há outro amostrador automático instalado (Figura 4.19), o qual é acionado quando a lâmina da água supera a altura de 0,30 m. Pela Resolução da Adasa, a lagoa deveria esvaziar após um evento de precipitação, não passando de 24 horas com água acumulada em sua área, mas quando ocorrem eventos próximos o volume acumulado é maior e assim ocorre um fluxo de saída durante muitos dias. Assim para alguns eventos, o amostrador foi ajustado para coletar as amostras de acordo com um horário pré-estabelecido, escolhido com base na previsão do tempo, pois o nível já se encontrava maior que 0,30 m no início do evento seguinte.



Figura 4.19. Amostrador instalado na saída da lagoa de detenção.

As amostras foram recolhidas após eventos de precipitação e analisadas no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) do PTARH na UnB. Os parâmetros de qualidade da água que foram escolhidos para análise são os que apresentam maior importância para estudos de qualidade da água do Lago Paranoá, e que são usados usualmente para esse tipo de estudo, como a DQO, nutrientes, além de parâmetros físicos como sólidos, condutividade e turbidez.

A Tabela 4.2 apresenta todos os parâmetros que foram analisados, juntamente com o método de análise que foi utilizado. O procedimento para análise das variáveis seguiu as orientações sugeridas pelo o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (ALPHA, 2008).

Tabela 4.2. Parâmetros e métodos de análise da qualidade da água utilizados.

Parâmetros	Método	Parâmetros	Método
Condutividade	Eletrométrico	DQO	Digestão de Hg
Turbidez	Nefelométrico	DBO	Manométrico
TDS	Baseado em solução de cloreto de sódio	Fósforo Reativo	
Sólidos Totais	Gravimétrico	Fósforo Total	Digestão de ácido persulfato
Sólidos Dissolvidos	Gravimétrico	Nitrito	Diazotização
Sólidos Suspensos	Gravimétrico	Nitrato	Redução de Cádmio
Coliformes	Colilert	Amônia	Nessler

Apesar de ter sido feita a análise laboratorial para todos os parâmetros listados na Tabela 4.2, os resultados apresentados no próximo capítulo focaram na análise dos nutrientes, fósforo e nitrogênio, além de algumas análises isoladas que foram feitas de DBO, DQO e coliformes.

Para coliformes foi realizada ainda uma coleta quando terminou o período chuvoso em Brasília, no começo do período da seca, em maio. Essa coleta foi feita na entrada da lagoa de detenção que sempre permanece alagada e em um poço de visita mais a montante da lagoa, para verificar-se se havia a presença de esgoto sanitário nas águas da galeria.

As concentrações de poluentes no escoamento gerado variam ao longo do evento hidrológico, assim como variam as vazões. Relacionando esses dados foram feitos polutogramas para se analisar o comportamento da qualidade da água na lagoa nos eventos observados.

Os dados obtidos também foram analisados de acordo com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, que estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes conforme o enquadramento do corpo hídrico.

4.3 MODELAGEM

A modelagem consistiu na simulação de ondas de cheias e da qualidade da água para eventos observados, utilizando o PCSWMM.

4.3.1 Base de dados

A modelagem numérica é uma representação matemática da distribuição espacial de determinadas características vinculadas a uma superfície real, assim neste projeto identificou-se as características da lagoa para a representação no modelo, a partir da rede de drenagem existente na área de estudo, com suas respectivas características, como a localização de poços de visitas e dados de cota, comprimento dos trechos, e características geométricas. Todos esses dados foram levantados no estudo de Volken (2018), e foram utilizados neste projeto.

A área de estudo foi dividida em sub-bacias, que são os compartimentos de análise utilizados pelo PCSWMM, de acordo com o uso e ocupação do solo e essas foram associadas aos poços de visitas mais próximos. Essa subdivisão também foi realizada por Volken (2018) e foi adotada no projeto. A área da rede de drenagem de 7,4 km² foi dividida em 3.836 sub-bacias associadas a 1.285 poços de visitas e 1.218 condutos.

Os dados de precipitação utilizados como entrada no programa são os que foram obtidos por meio do monitoramento com os cinco pluviógrafos instalados na área de drenagem. Esses dados são adicionados ao modelo por meio de séries com valores de volume em intervalos de cinco minutos. Também foram utilizados os hidrogramas observados para os três eventos, a fim de analisar a eficiência do modelo com os dados simulados.

4.3.2 Parâmetros do modelo

Para a modelagem hidráulico-hidrológica adotou-se o modelo de infiltração Curva Número do SCS, por conta da facilidade de obtenção dos dados desse, que caracteriza o solo conforme sua capacidade de infiltração determinando o coeficiente superficial. A classificação do solo para a área de estudo foi realizada por Volken (2018), como apresentado no Tópico 4.1.5.

O método de propagação de escoamento na rede de drenagem utilizado foi o da onda dinâmica, pois apresenta uma resolução completa das equações de Saint-Venant, em que se consideram os escoamentos não uniformes e não permanentes.

4.3.3 Análise de eficiência e calibração

O PCSWMM possui ferramentas de análise de eficiência do modelo e da calibração. Para a verificação do modelo comparam-se os dados observados durante o monitoramento com os dados simulados pelo PCSWMM. Os parâmetros utilizados para essa análise foram o R² (coeficiente de correlação) e o NSE (*Nash-Sutcliffe*).

O coeficiente NSE (Equação 4.3) é muito utilizado na avaliação de modelagem hidrológica, e pode variar entre $-\infty$ e 1. Quanto mais próximo for de um, melhor será o ajuste entre os dados observados e simulados, já valores abaixo de zero significam que o uso da média dos dados observados é melhor que a utilização da simulação.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \mu)^2} \quad \text{Equação 4.3}$$

Em que:

Q_{obs} : Vazão observada;

Q_{sim} : Vazão simulada;

μ : Média das vazões observadas.

Foram simulados os três eventos observados com os dados de entrada de precipitação e os hidrogramas observados. As simulações para os três eventos foram calibradas a fim de se encontrar a melhor calibração entre esses. A configuração da melhor calibração foi utilizada para a verificar a eficiência do modelo utilizando os três eventos observados.

Para a calibração dos modelos foram alterados cinco parâmetros, atribuindo-lhes porcentagens de incerteza através da ferramenta de calibração *Sensitivity-based Radio Tuning Calibration - SRTC* do PCSWMM. Os parâmetros e as incertezas utilizados nesse projeto foram selecionados com base no estudo de Tsuji (2018) que seguiu as faixas recomendadas pelo PCSWMM para a atribuição das incertezas. Os parâmetros alterados foram: armazenamento em depressões permeáveis (*Dstore perv*), área das sub-bacias (*area*), largura de escoamento nas sub-bacias (*width*), curva número (CN) e a rugosidade dos canais da rede de drenagem (*roughness*).

4.3.4 Simulação dos poluentes

Para a análise de qualidade da água foram utilizados como poluentes os indicadores de qualidade nitrogênio total e fósforo total. As simulações de qualidade foram feitas considerando o processo *build up* e o *wash off*. O *build up* considera os poluentes que são acumulados na superfície durante a ausência de chuvas. Já o *wash off* é caracterizado pela lavagem dos poluentes durante as precipitações, onde o escoamento gerado pela chuva carrega os poluentes depositados nas superfícies (Alvarez, 2010). O PCSWMM dispõe de três tipos de funções que permitem a inserção de coeficientes para o acúmulo de poluentes e para a lavagem de poluentes.

A função exponencial (EXP) representada pela Equação 4.4 foi utilizada no processo *build up*. Nesse projeto não foram levantados dados para a construção da curva com os coeficientes utilizados no processo, assim adotaram-se os coeficientes utilizados no estudo de Costa (2013), que seguiu a metodologia adotada por Alvarez (2010). Costa (2013) percebeu no seu estudo que os processo de acumulação dos poluentes não apresentam grande sensibilidade para o uso e ocupação, assim adotou os mesmos coeficientes para todos os usos, sendo C1 igual a 0,99 e C2 de 0,0206.

$$EXP = C1(1 - e^{C2 t}) \quad \text{Equação 4.4}$$

Em que: C1 é o acúmulo máximo possível de poluentes (massa por unidade de área) e C2 é a constante de crescimento do poluente acumulado (1/dia).

Para o *wash off* foi utilizada a função curva de taxa de lavagem (*Rating Curve*, RC) expressa na Equação 4.5, em que C1 é o coeficiente de lavagem, C2 é o expoente de lavagem e Q é a vazão do escoamento. Esses coeficientes foram estimados por um ajuste não linear tipo potência com os dados do fluxo de massa do Ptotal e Ntotal (em mg/s) e as vazões (em m³/s) correspondentes, obtidos para os três eventos analisados.

$$RC = C1 . Q^{C2} \quad \text{Equação 4.5}$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir do monitoramento qualitativo realizado na entrada e saída da lagoa de retenção do Guará II. Os levantamentos em campo da vazão e nível da água e do volume precipitado, por meio dos cinco pluviômetros, constituíram o monitoramento quantitativo e as coletas e análises de amostras de água constituíram o monitoramento qualitativo. No processo de modelagem, foram utilizados os resultados obtidos pelo monitoramento para a calibração do modelo.

5.1 EVENTOS

O monitoramento qualitativo ocorreu de novembro de 2018 a maio de 2019 com o auxílio dos amostradores automáticos. Cada coleta realizada, na entrada e na saída da lagoa de retenção, foi considerada inicialmente como um evento analisado. A Tabela 5.1 apresenta um resumo dos eventos coletados indicando a data da coleta, o horário de início da coleta realizada pelo amostrador, o intervalo de tempo entre a coleta de uma amostra e a seguinte, e quantas amostras foram recolhidas.

Tabela 5.1. Resumo da coleta dos eventos de qualidade para a entrada e saída da lagoa.

ENTRADA					SAÍDA				
Evento	Data	Início da coleta	Δt (min)	Nº de amostras	Evento	Data	Início da coleta	Δt	Nº de amostras
1	12/11/18	20:00	10	24	12	11/11/18	06:35	10 min	24
2	15/11/18	21:43	10	19	13	15/11/18	09:39	1 h	14
3	04/12/18	14:26	5	24	14	22/11/18	09:30	1 h	24
4	08/12/18	13:06	10	24	15	27/11/18	09:30	1 h	7
5	22/12/18	16:23	10	24	16	08/12/18	17:17	30 min	24
6	26/12/18	21:39	10	24	17	09/12/18	10:08	1 h	24
7	26/01/19	13:23	5	24	18	24/12/18	14:39	1 h	24
8	09/02/19	16:09	5	24	19	27/12/18	10:00	1 h	23
9	22/02/19	19:20	5	24	20	10/02/19	14:38	1 h	22
10	25/02/19	07:42	5	24	21	25/02/19	09:29	1 h	24
11	16/03/19	20:53	5	24	22	17/03/19	00:37	1 h	24

Para todos eventos apresentados na Tabela 5.1 o amostrador foi ajustado para recolher 24 amostras, assim os eventos que recolheram menos que 24 amostras apresentaram falha na bateria, a qual acabou antes de recolher todas as amostras. Foram recolhidos 11 eventos na entrada e 11 eventos na saída da lagoa de retenção, totalizando em 22 eventos e 493 amostras.

Para todos os eventos apresentados foram realizadas as análises de doze parâmetros físicos e químicos: condutividade, turbidez, TDS, sólidos (totais, dissolvidos e suspensos), DQO, nitrato, nitrito, amônia, fósforo total e fósforo reativo. O trabalho de análise laboratorial foi realizado em conjunto com De Paula (2019) e Batista (2019) por conta da grande quantidade de amostras e parâmetros analisados. Desse modo, este projeto focou em analisar os dados obtidos para os nutrientes, por conta do volume de dados, assim os outros parâmetros serão avaliados em outros trabalhos.

Como um dos objetivos do trabalho é analisar a influência da lagoa de retenção na qualidade da água, verificou-se, entre as coletas realizadas, quais eventos da entrada correspondiam a eventos da saída da lagoa de retenção. De acordo com o que foi observado em campo e analisando os dados de nível registrados pelos linígrafos, considerando o tempo entre os picos de vazão, concluiu-se que a água que entra na lagoa leva, em média, 4 horas para chegar à saída. Usando esse critério, apenas 3 eventos monitorados puderam ser considerados como correspondentes ao mesmo evento de precipitação para avaliar a lagoa. Esses eventos em comum estão sombreados de verde, azul e rosa na Tabela 5.1.

A Tabela 5.2 apresenta os eventos utilizados para avaliar a influência da lagoa de retenção no tratamento de nutrientes, os quais são considerados como um único evento de precipitação para a entrada e saída da lagoa.

Tabela 5.2. Eventos escolhidos para serem analisados para a lagoa de retenção.

	Coleta na entrada	Δt na entrada	Coleta na saída	Δt na saída
Evento 1	08/12/18 às 13h07	10 min	08/12/18 às 17h17	30 min
Evento 2	25/02/19 às 07h42	5 min	25/02/19 às 09h29	1 h
Evento 3	16/03/19 às 20h53	5 min	17/03/19 às 00h37	1 h

A análise de qualidade (nutrientes), e de quantidade considerando a precipitação e a vazão, foram baseadas nesses 3 eventos apresentados na Tabela 5.2.

Para o evento 3 (Tabela 5.2) ainda foi realizada uma análise isolada de DBO para seis amostras, e de coliformes para cinco amostras.

5.2 DADOS DE PLUVIOMETRIA

O monitoramento da precipitação da chuva também foi realizado durante todo período do monitoramento da qualidade. Foram feitos os hietogramas para os três eventos em análise,

considerando os cinco pluviômetros instalados na área de contribuição da lagoa de detenção do Guará II. As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam esses gráficos para cada evento.

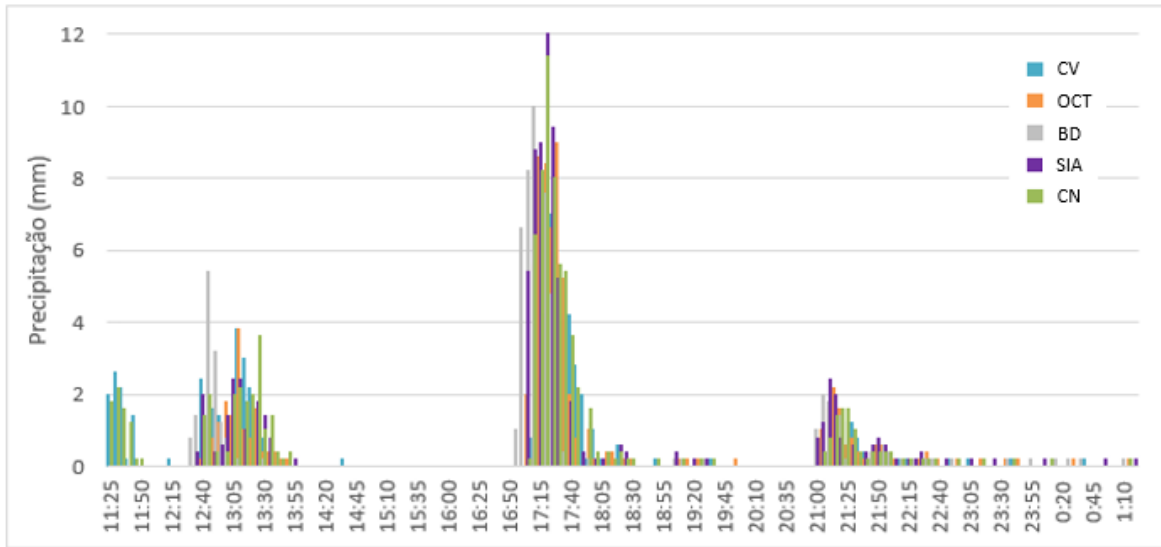


Figura 5.1. Precipitação (volume acumulado em 5 minutos) no Evento 1 (08 e 09/12/18).

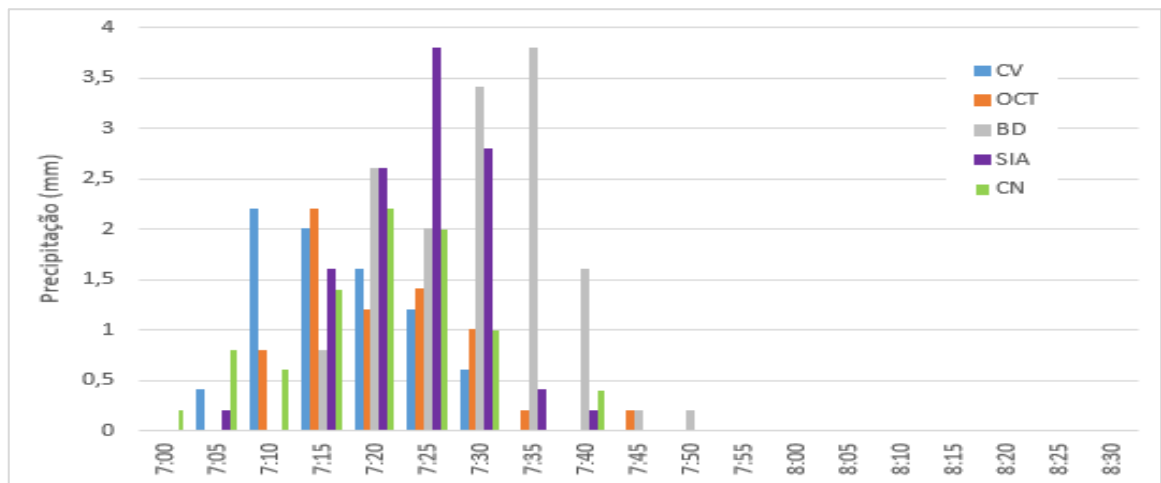


Figura 5.2. Precipitação (volume acumulado em 5 minutos) no Evento 2 (25/02/19).

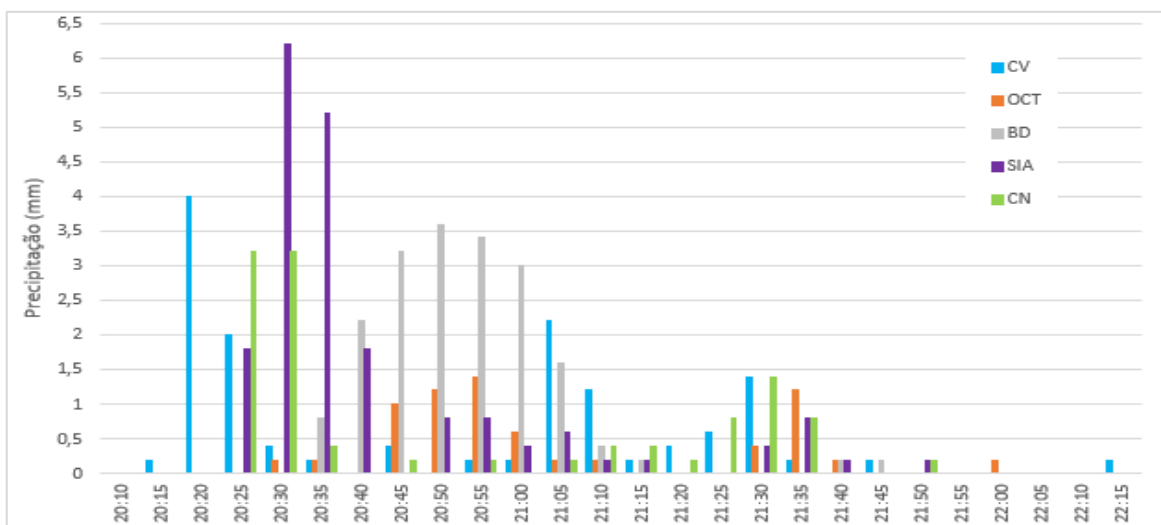


Figura 5.3. Precipitação (volume acumulado em 5 minutos) no Evento 3 (16 e 17/03/19)

Nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3 os pluviógrafos foram denominados com uma sigla para simplificar a identificação da localização desses, onde: CV refere-se ao pluviógrafo instalado no Centro Comercial Cruzeiro, Cruzeiro Velho; OCT no AOS 1, bloco D, Octogonal; BD ao lado da Bacia de detenção do Guará; SIA no SIA, quadra 5C; e CN no SHCES 409, bloco A, Cruzeiro Novo. Essa nomenclatura será utilizada nos próximos tópicos do trabalho. A Figura 4.11 apresentada na Metodologia mostra o mapa da localização dos pluviógrafos.

As precipitações na região têm como característica a grande variabilidade espacial e isso é observado nos registros de pluviometria feitos para a área de contribuição da lagoa de detenção (Figura 5.1, 5.2 e 5.3), pelas diferenças na precipitação em cada pluviógrafo. No evento 1 as maiores precipitações ocorreram na parte mais central da área de drenagem da lagoa, no Cruzeiro Novo e SIA, já no evento 2 e 3 a maior precipitação ocorreu mais ao sudeste da área, no SIA e na área da lagoa de detenção.

Realizou-se a análise da intensidade-duração-frequência para os 3 eventos em estudo. Essa análise foi feita a partir da equação da curva IDF adotada pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal (Equação 5.1).

$$i = \frac{1547,7 * Tr^{0,207}}{(t+11)^{0,884}} \quad \text{Equação 5.1}$$

Sendo:

i = intensidade da precipitação (mm/h);

Tr = tempo de retorno (anos);

t = duração da precipitação (min).

Com os dados de intensidade e de duração da precipitação, obtidos através dos pluviógrafos, foi possível calcular o tempo de retorno correspondente para cada evento (Tabela 5.3). O tempo de retorno da precipitação é importante para saber quão significativo foi o evento.

Para os eventos 2 e 3 foram encontrados tempos de retorno inferiores a um ano, e as chuvas foram rápidas, não causando muito impacto. Já o evento 1 apresentou grandes durações de precipitação e um maior volume precipitado, com tempos de retorno maiores (Tabela 5.3).

Tabela 5.3. Dados de precipitação e o tempo de retorno para os 3 eventos analisados.

	Vol (mm)			t (min)			i (mm/h)			Tr (anos)		
	Evento			Evento			Evento			Evento		
Pluviógrafos	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
CV	74,6	8,0	14,2	310	30	85	14,44	16,00	10,02	7,25	< 1	< 1
OCT	80,4	7,0	7,0	300	35	55	16,08	12,00	7,64	10,65	< 1	< 1
BD	77,4	20,4	20,8	240	65	90	19,35	18,83	13,87	10,43	< 1	< 1
SIA	91,8	11,6	19,6	290	35	70	18,99	19,89	16,80	20,70	< 1	< 1
CN	92,6	8,6	11,6	310	40	65	17,92	12,90	10,71	20,58	< 1	< 1

A análise da intensidade e duração das chuvas é importante porque esses fenômenos promovem impactos no tipo e quantidade de poluentes presentes, como também no escoamento superficial.

5.3 DADOS DE VAZÃO

A vazão afluyente e efluente da lagoa de detenção foi determinada a partir da curva-chave teórica gerada após as medições de vazão em campo com o equipamento ADC, conforme mostrado no item 4.2.2 da Metodologia.

Com as equações da curva-chave e os dados do monitoramento de nível, medidos pelos linígrafos instalados, obteve-se a vazão para os três eventos em análise. Foram construídos os hidrogramas, para cada um dos três eventos, considerando toda a duração da precipitação do evento com um intervalo de 5 minutos entre os dados.

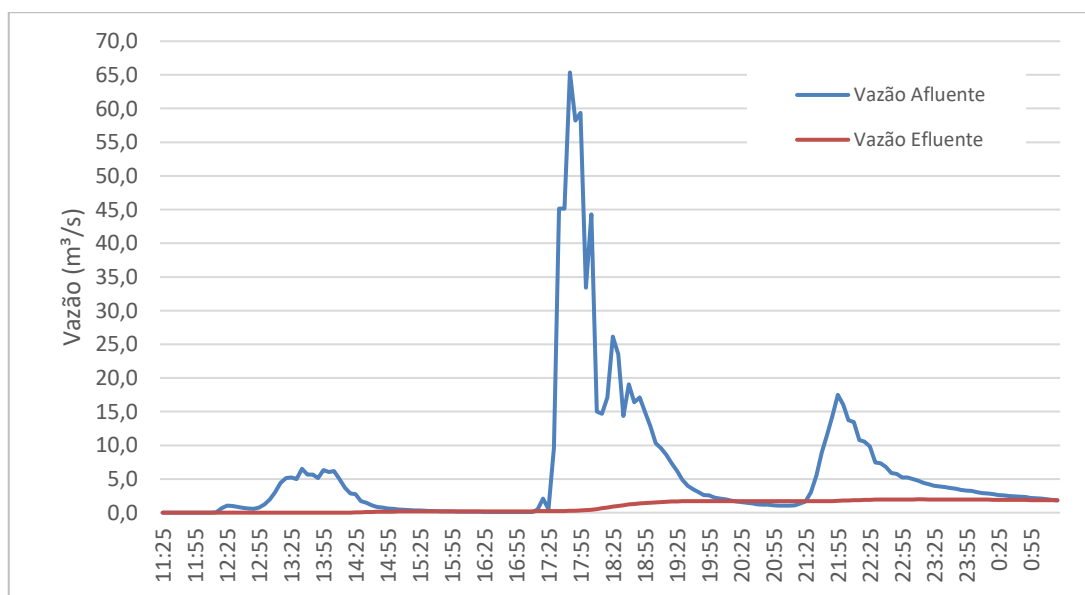


Figura 5.4. Hidrograma do evento 1 (08/12/18).

A Figura 5.4 mostra o hidrograma observado da vazão afluyente e efluente da lagoa de detenção para o primeiro evento. A vazão máxima atingida foi de 65,36 m³/s que corresponde a uma cota de 0,87 m, no fim da tarde do dia 08/12/18. Esse evento todo apresenta uma intensidade média de 15,92 mm/h, acumulando 83,4 mm em 4,8 horas de chuva. A precipitação na área de contribuição da lagoa teve início às 11:25 mas a entrada da lagoa só começou a apresentar vazão a partir das 12:25. O amostrador automático instalado recolheu as amostras no primeiro pico do hidrograma, o qual não apresentou uma vazão alta, com apenas 6 m³/s correspondente a uma cota de 0,64 cm.

Observando a vazão afluyente e efluente (Figura 5.4) tem-se a noção de como a lagoa de detenção é capaz de amortecer a vazão, que apresentou uma vazão de pico máxima de 65,36 m³/s na entrada da lagoa, enquanto o pico na saída é de 1,98 m³/s, tendo uma eficiência de 96,9 % de amortecimento. A cota correspondente ao pico do hidrograma da saída é de 1,27 m. Antes de iniciar precipitação do evento 1 o linígrafo localizado na saída da lagoa marcava 0,10 m de cota, correspondente a uma vazão de 0,005 m³/s.

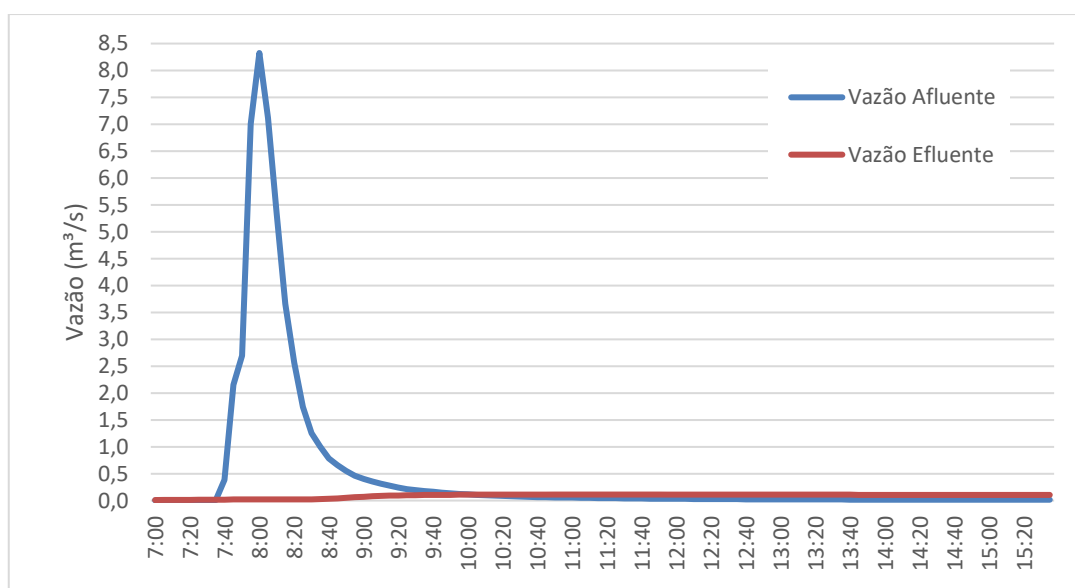


Figura 5.5. Hidrograma do evento 2 (25/02/19).

A Figura 5.5 apresenta o hidrograma para o evento 2, que ocorreu em 25 de fevereiro de 2019. A precipitação desse evento foi muito menor se comparada com o evento 1, acumulando em média 11,1 mm em 41 minutos de duração. Assim o pico gerado tanto na entrada como na saída da lagoa também foi menor. A precipitação iniciou às 7 horas e o pico do hidrograma na entrada da lagoa, de 8,32 m³/s, ocorreu às 8 horas. A saída da lagoa já apresentava uma cota de 14,7 cm antes da ocorrência do evento 2, por acúmulo de água de precipitações anteriores, assim a cota necessária para acionar o amostrador foi atingida antes

do período de quatro horas. O pico máximo na saída foi de 0,11 m³/s, referente a uma cota de 37,8 cm. Assim, nesse evento houve uma eficiência de 98,7% de amortecimento, considerando os picos máximos de vazão afluente e efluente.

O hidrograma para o evento 3 está na Figura 5.6. Esse evento, entre os três analisados, foi o que apresentou menor intensidade de precipitação, em média 11,8 mm/h, o qual acumulou 14,64 mm em 1,2 horas de chuva. Houve uma pequena precipitação no dia do evento, 16/03/19, às 18 horas, mas a chuva só foi intensa a partir das 20 horas, fazendo com que o pico do hidrograma na entrada da lagoa de detenção ocorresse às 21:15, atingindo 6,37 m³/s, sendo o menor pico entre os 3 eventos. A saída da lagoa não apresentava vazão antes desse evento e por ter o menor pico de vazão na entrada, também apresentou o menor pico de vazão no hidrograma da saída da lagoa de detenção, com apenas 0,084 m³/s, correspondente a uma cota de 0,34 m. O amortecimento da vazão de pico máximo desse evento foi de 98,7 %.

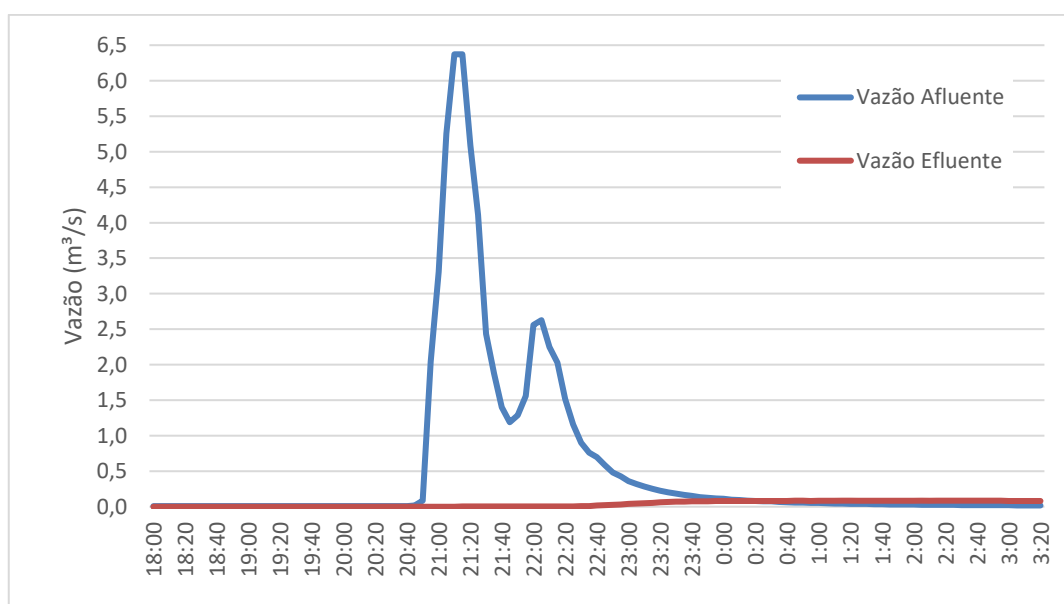


Figura 5.6. Hidrograma do evento 3 (16 e 17/03/19).

A Resolução n° 9/2011, da Adasa, que dispõe sobre os procedimentos gerais de obtenção de outorga e lançamento de águas pluviais em corpos hídricos do Distrito Federal, em seu Capítulo IV discorre sobre os reservatórios de quantidade, especifica que o lançamento direto da água drenada só é permitido para valores abaixo de 24,4 L/(s.ha). Como a área de drenagem da área em estudo corresponde a 7,4 km², o valor permitido para o lançamento da água drenada direto no córrego Guará é de 18,06 m³/s.

Para os eventos observados, se não houvesse a lagoa de detenção, o lançamento da água drenada, nesse caso considerando a vazão afluente na lagoa de detenção, seria superior ao

preconizado pela Adasa para o evento 1, que apresentou uma maior precipitação. Considerando a lagoa de detenção, onde nos eventos observados a vazão efluente máxima da lagoa encontrada foi de 1,98 m³/s (evento 1), tem-se que a lagoa apresenta um amortecimento de vazão muito eficiente, liberando valores muito abaixo do preconizado na Resolução nº 9/2011 da Adasa.

5.4 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA

Como apresentado no tópico 5.1, o projeto focou nas análises nos três eventos especificados na Tabela 5.2. Em cada um desses eventos foram recolhidas 24 amostras na entrada e na saída da lagoa de detenção, resultando em 144 amostras. Para esses três eventos será apresentada a análise feita para os nutrientes.

Além desses três eventos, foram recolhidas algumas amostras em outros dias para a análise de coliformes. Também foi realizada uma análise isolada de DBO e coliformes para seis amostras do evento 3.

5.4.1 Nutrientes

A análise dos nutrientes, nitrogênio e fósforo, é de grande importância visto que são nutrientes limitantes ao desenvolvimento de organismos, capazes de levar à deterioração da qualidade da água pela eutrofização dos corpos d'água.

As cargas de nutrientes encontradas no escoamento superficial urbano normalmente são baixas, quando comparadas com outras fontes com que as águas pluviais podem estar associadas, como as ligações irregulares de esgotos domésticos nas galerias de drenagem.

5.4.1.1 Nitrogênio

A determinação das formas predominantes de nitrogênio é capaz de indicar sobre a temporalidade e espacialidade do estágio da poluição acontecida a montante, se a origem desse nutriente for os esgotos.

O nitrogênio foi medido na forma de amônia (NH₃⁺ – N), nitrito (NO₂⁻ – N) e nitrato (NO₃⁻ – N). O N total é a soma das concentrações dessas três formas. Nas Figuras 5.7 a 5.12 é possível observar os polutogramas das formas de nitrogênio juntamente com o hidrograma e o hietograma correspondente de cada evento.

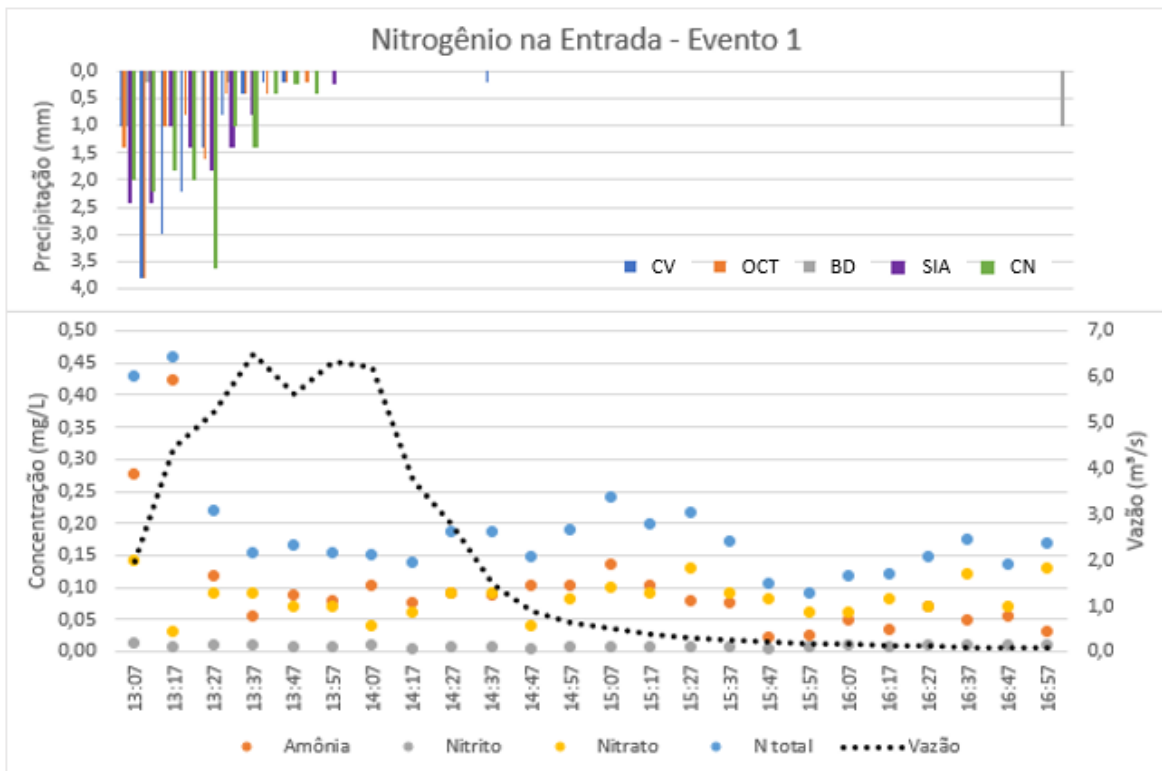


Figura 5.7. Análise das formas de Nitrogênio na entrada da lagoa de detenção no evento 1 (08/12/18).

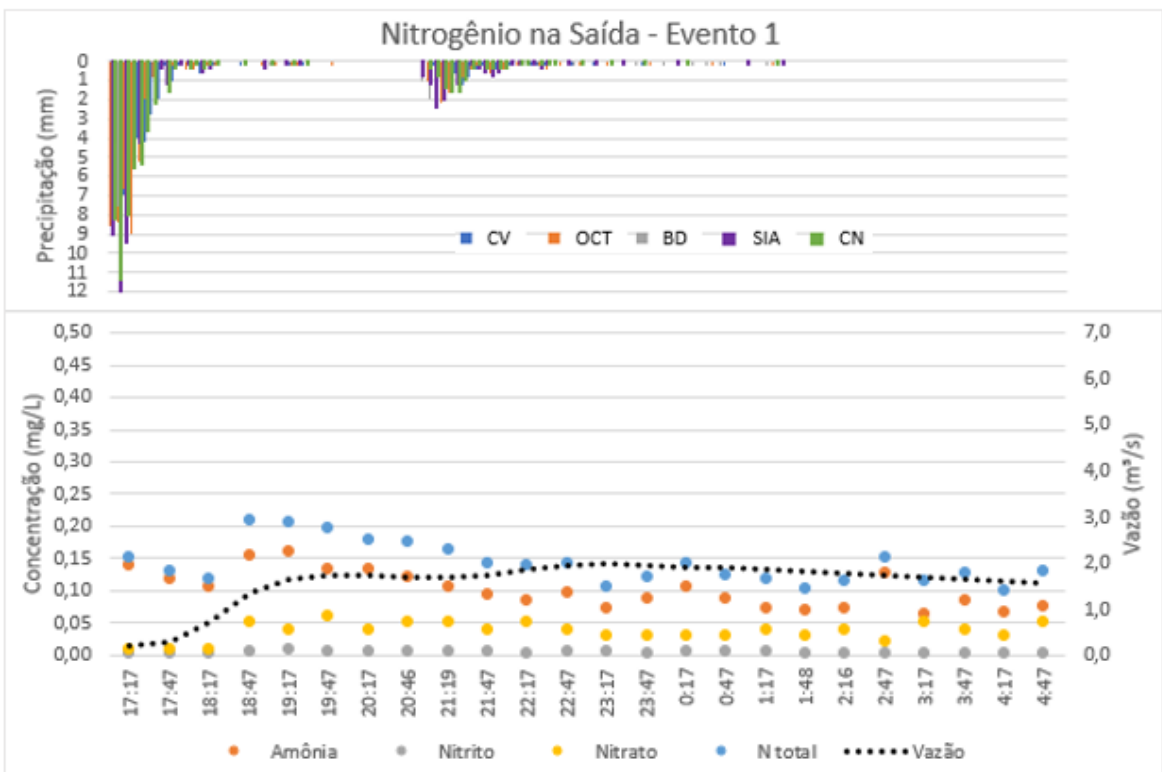


Figura 5.8. Análise das formas de Nitrogênio na saída da lagoa de detenção no evento 1 (08/12/18-09/12/18).

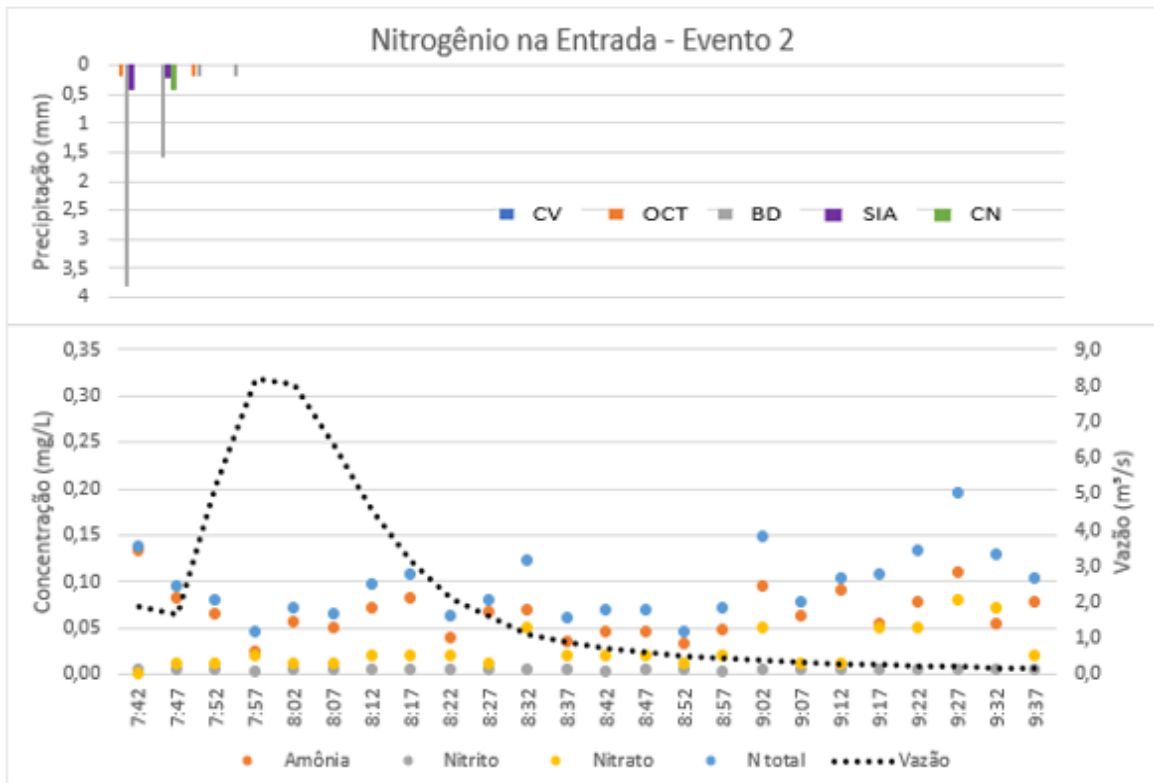


Figura 5.9. Análise das formas de Nitrogênio na entrada da lagoa de detenção no evento 2 (25/02/19).

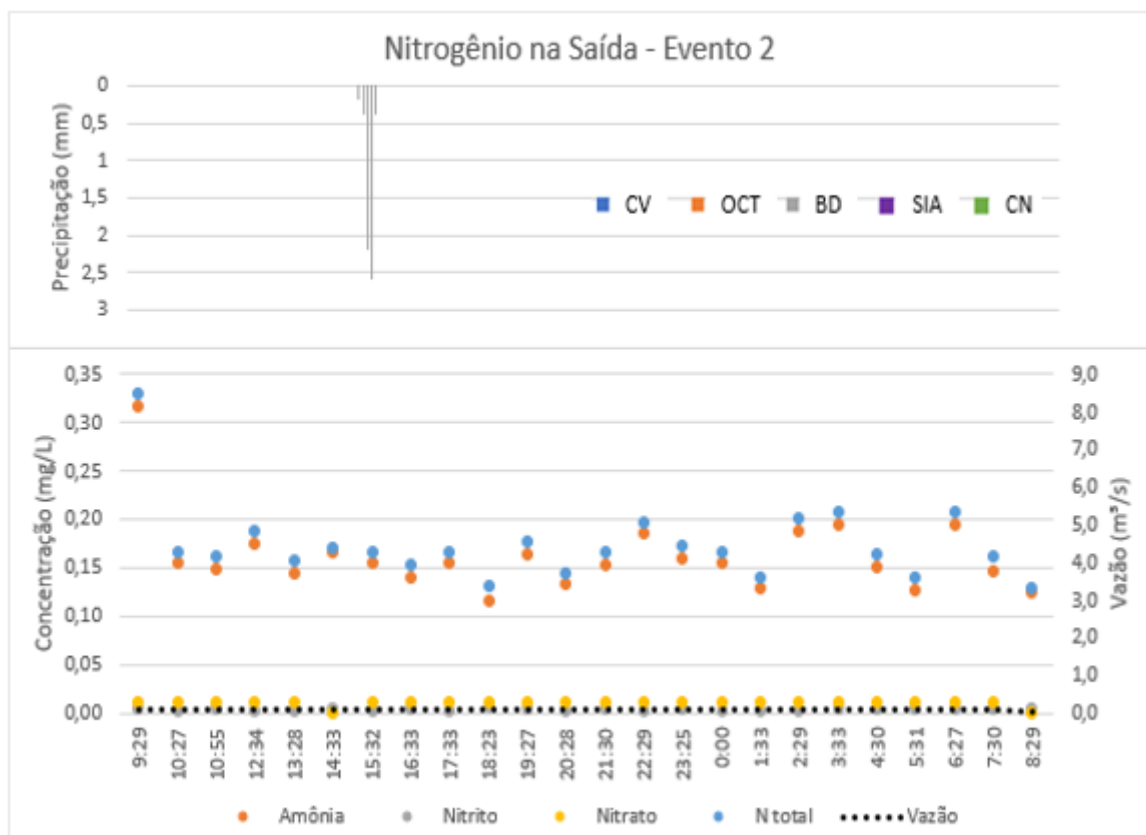


Figura 5.10. Análise das formas de Nitrogênio na saída da lagoa de detenção no evento 2 (25/02/19 – 26/02/19).

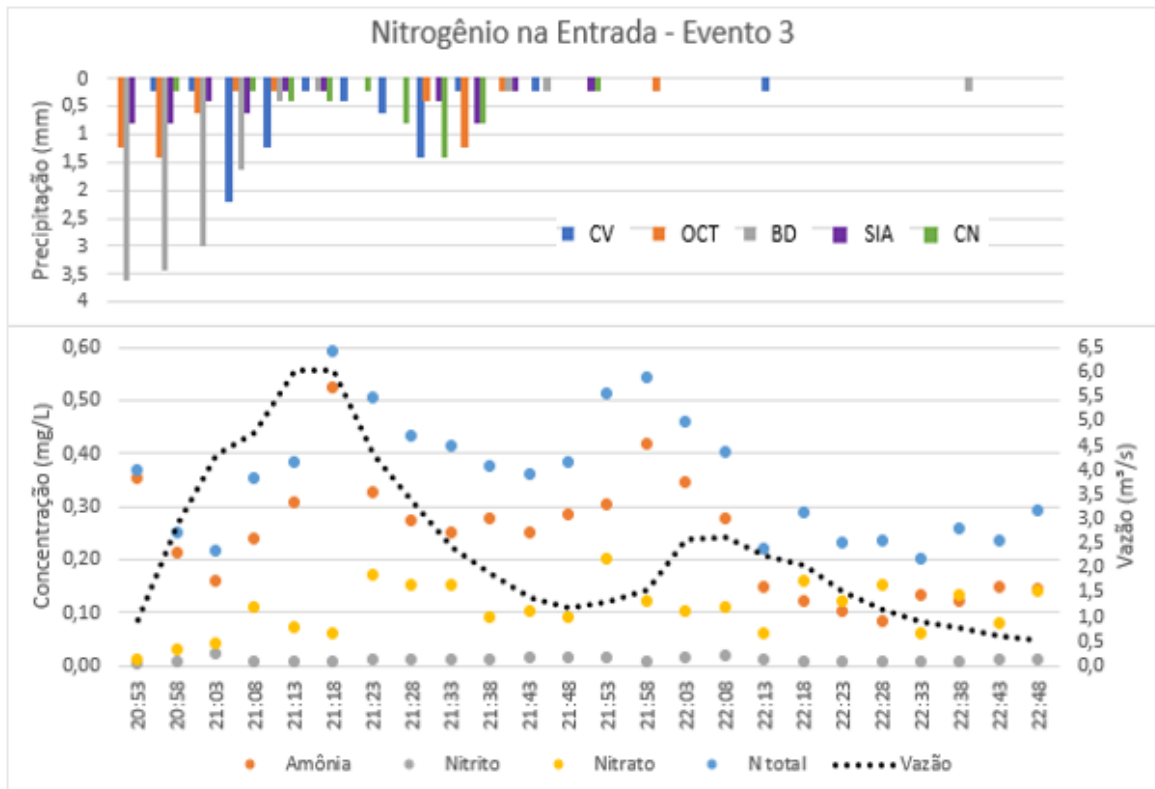


Figura 5.11. Análise das formas de Nitrogênio na entrada da lagoa de detenção no evento 3 (16/03/19).

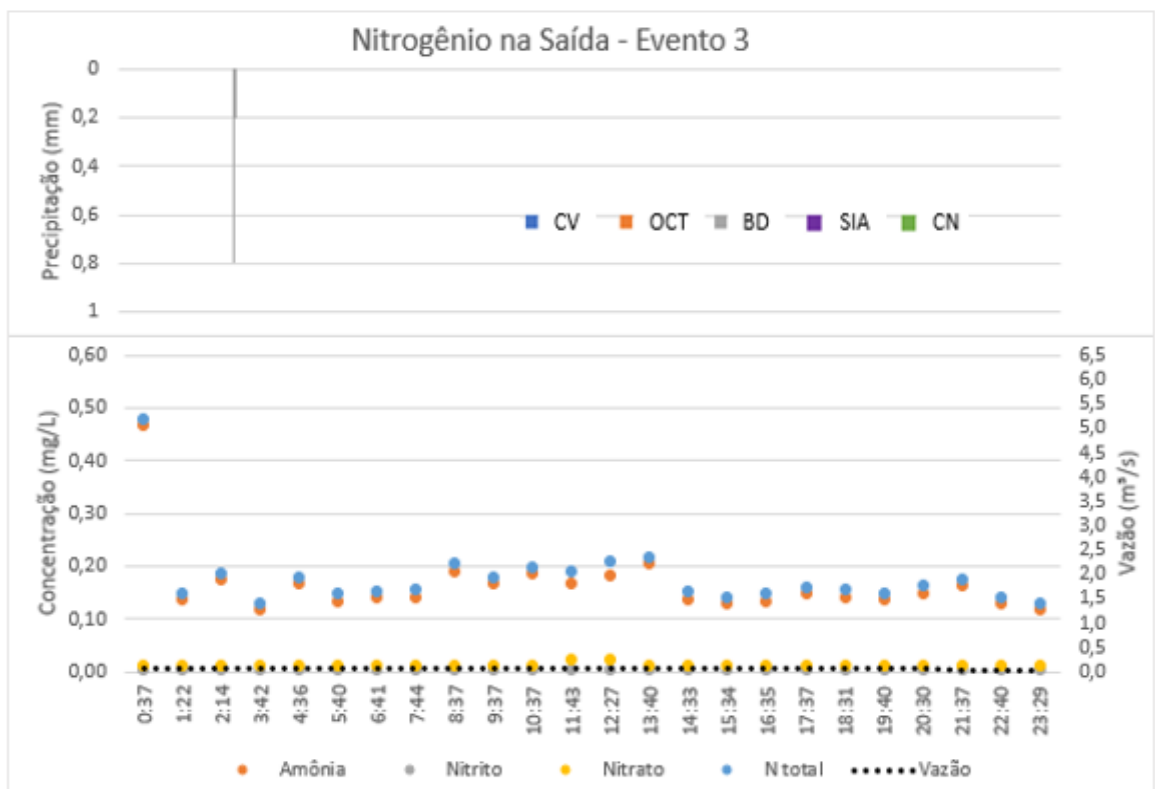


Figura 5.12. Análise das formas de Nitrogênio na saída da lagoa de detenção no evento 3 (16/03/19 – 17/03/19).

Observa-se nas Figuras 5.7, 5.9 e 5.11 que, enquanto há fluxo de vazão na entrada da lagoa, durante a passagem da onda de cheia, a amônia predomina, e quando essa vazão começa a diminuir, a nova predominância é o nitrato. Isso pode ocorrer pois quando há vazão gerada pelo escoamento superficial, esgotos lançados na galeria chegam rapidamente na entrada da lagoa de detenção, não havendo tempo para ocorrer nitrificação da amônia do esgoto, caracterizando um foco de poluição mais recente. Quando as vazões das águas pluviais diminuem, o carreamento do esgoto se torna lento havendo tempo para transformação da amônia para nitrito, chegando até o nitrato, o qual é relacionado com uma descarga de esgoto mais antiga. Essa mudança de predominância da forma do nitrogênio é mais nítida no evento 1, na Figura 5.7.

No evento 1, a lagoa de detenção não foi muito efetiva na remoção da amônia e do nitrato, comparando-se as concentrações na entrada e na saída da lagoa (Figura 5.7 e 5.8), o que pode ser relacionado com o fato de que houve um grande volume precipitado nesse evento, aumentando a cota da lâmina de água dentro da lagoa, assim como a vazão de saída, onde a saída marcava 0,50 m às 17:17, chegando até 1,27 m às 23:17. Desse modo a água pode passar com baixo tempo de permanência na lagoa e sem remoção pela vegetação, evidenciando um curto-circuito na estrutura. Mas ainda assim, considerando as concentrações máximas de entrada e saída, a lagoa apresentou um abatimento de 61% para a amônia (de 0,42 mg/L para 0,16 mg/L) e de 57% para o nitrato (de 0,14 mg/L para 0,06 mg/L).

Já para os eventos 2 e 3, que não apresentaram um grande volume de precipitação, a lagoa foi capaz de reter praticamente toda concentração de nitrato, com um abatimento da concentração de 87,5% para o evento 2, e de 90% para o evento 3 (Figuras 5.9 a 5.12). Porém, a lagoa não foi efetiva para a remoção da amônia em nenhum dos eventos. Inclusive, para o evento 2, as concentrações da amônia na saída da lagoa foram maiores que na entrada (Figuras 5.9 e 5.10). No evento 3, a concentração média de amônia na entrada, 0,24 mg/L, reduziu para uma concentração média de 0,16 mg/L na saída, com um abatimento médio das concentrações de 33,3 % (Figuras 5.11 e 5.12).

As concentrações de nitrogênio total foram maiores para o evento 3, com uma concentração máxima de 0,592 mg/L, o que pode ser relacionada com a quantidade de dias antecedentes que não houve precipitação, nesse caso, foram 2 dias sem chuva, havendo mais tempo para o acúmulo de nutrientes e matéria orgânica até a lavagem realizada pela chuva. Já para o evento 1 e 2, os dias anteriores choveram, acumulando menos poluentes.

As informações estatísticas das análises de nitrogênio para os três eventos são apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Parâmetros estatísticos das análises de nitrogênio nas diferentes formas na entrada e na saída da lagoa de detenção.

	ENTRADA DA LAGOA			
	N total (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Nitrato (mg/L)
Média	0,211	0,134	0,007	0,071
Mediana	0,170	0,089	0,006	0,070
Mínimo	0,046	0,022	0,003	0,000
Máximo	0,591	0,523	0,020	0,200
Desvio	0,137	0,111	0,003	0,047
	SAÍDA DA LAGOA			
	N total (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Nitrato (mg/L)
Média	0,164	0,142	0,003	0,019
Mediana	0,155	0,138	0,003	0,010
Mínimo	0,100	0,062	0,001	0,000
Máximo	0,478	0,466	0,008	0,060
Desvio	0,051	0,056	0,001	0,015

As concentrações de nitrito geralmente são menores que as outras formas de nitrogênio, por estar na situação de transição entre a amônia e o nitrato, e pelo processo de conversão de nitrito em nitrato ser quase instantâneo. Isso é observado para os 3 eventos na entrada da lagoa, onde a concentração máxima de nitrito encontrada foi de 0,02 mg/L (Tabela 5.4), no evento 3. Apesar da concentração do nitrito na entrada da lagoa ser baixa, a lagoa foi capaz de conter esses poluentes, praticamente zerando a concentração desses na saída, com um abatimento máximo da concentração de 60%.

Essas concentrações baixas de nitrito em águas de drenagem pluvial são observadas em outros estudos realizados no DF. Costa (2013) e Souza (2014) analisaram as sub-bacias do Centro Olímpico da UnB e do Iate Clube e obtiveram as concentrações de nitrito, mínimas e máximas, variando de 0,003 a 0,12 mg/L e de 0,001 a 0,187 mg/L, respectivamente, e Tsuji (2018) que estudou a bacia do Riacho Fundo I teve os valores mínimos e máximos de concentração de 0,003 a 0,123 mg/L.

Analisando a Tabela 5.4 verifica-se que entre as formas de nitrogênio, a amônia apresenta as maiores concentrações, variando de 0,022 a 0,523 mg/L, para a entrada da lagoa. Isso também condiz com os resultados apresentados por Costa (2013) e Souza (2014) que obtiveram os valores em intervalos entre 0,04 e 2,27 mg/L, e 0,018 e 2,35 mg/L. E Tsuji (2018) obteve as concentrações de amônia variando de 0,09 a 2,9 mg/L. Esses trabalhos apresentam valores máximos maiores pois são referentes a um período maior de monitoramento, inclusive com eventos logo após o período da seca, que apresentam maiores concentrações.

Para o nitrato os resultados obtidos na entrada da lagoa de detenção oscilaram entre 0 e 0,2 mg/L, que são concentrações baixas se comparadas novamente com os trabalhos de Costa (2013), Souza (2014) e Tsuji (2018) que apresentaram, respectivamente, intervalos de: 0,01 a 2,5 mg/L; 0,01 a 0,7 mg/L; e 0,01 a 0,8 mg/L.

De acordo com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos hídricos classificados como classe II, as concentrações das formas de nitrogênio para os 3 eventos estão bem abaixo do valor máximo permitido. O máximo preconizado para nitrato é 10 mg/L, sendo que a concentração máxima analisada foi de 0,2 mg/L, para nitrito é permitido até 1 mg/L e o máximo observado foi de 0,02 mg/L, e para a amônia o máximo permitido é 3,7 mg/L e o analisado foi de 0,52 mg/L. A verificação foi feita com as concentrações máximas considerando as amostras da entrada e da saída.

Gomes (2015) também realizou a análise de qualidade da água conforme os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para 8 conjuntos de bacias de detenção do DF, localizadas: no Recanto das Emas, em Cruzeiro, na Quadra 303 do Recanto das Emas, em Brazlândia, na Área de Desenvolvimento Econômico em Ceilândia, no Setor O de Ceilândia, em Samambaia e em Santa Maria. Assim como neste estudo, todas as bacias apresentaram as concentrações das formas de nitrogênio dentro dos limites da Resolução CONAMA.

Com base em todos esses estudos apresentados pode-se dizer que as águas pluviais do DF isoladamente não apresentam grandes problemas em relação ao parâmetro nitrogênio, porém a questão da poluição difusa é a diversidade das fontes, como também nos pontos de lançamento, que se descarregados em grande número de exutórios de drenagem, como acontece, pode se transformar em problemas para os corpos hídricos receptores quando se analisa a carga conjunta.

5.4.1.2 Fósforo

A origem do fósforo, no escoamento superficial, está relacionada com a deposição atmosférica, despejos domésticos contendo detergentes, o lixiviado de fertilizantes utilizados na adubação de jardins e outros resíduos orgânicos. O fósforo foi analisado em duas formas diferentes: fósforo total e fósforo reativo. Porém a análise dos resultados foi feita apenas para o fósforo total (P) através de polutogramas, apresentados juntamente com o hidrograma e hietograma, feitos para cada um dos eventos (Figuras 5.13 a 5.18).

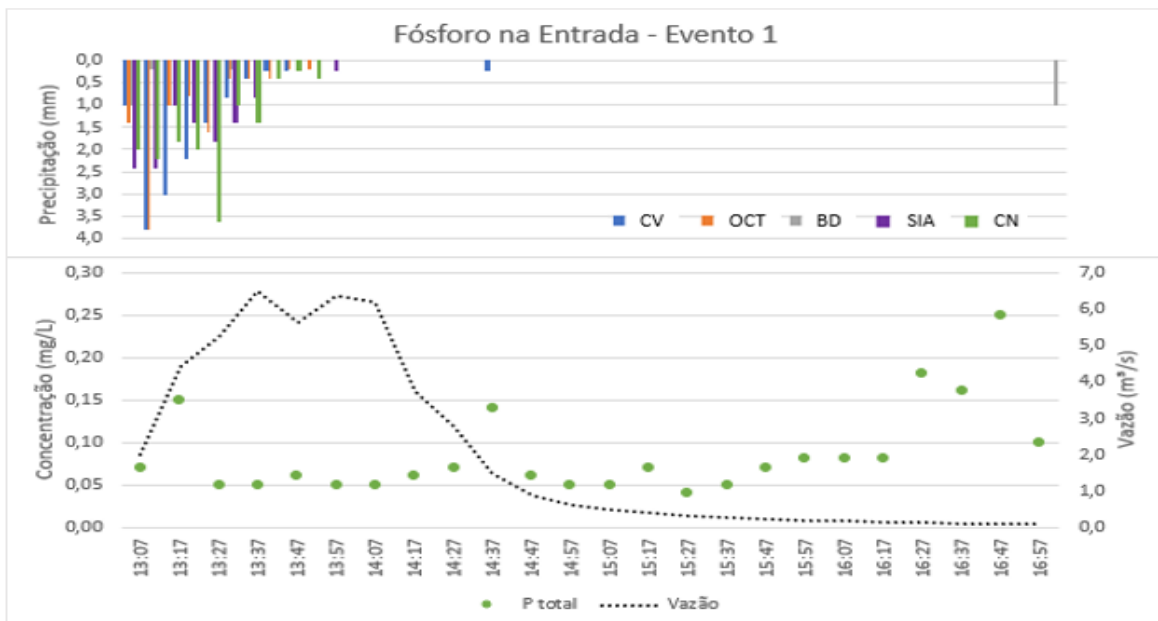


Figura 5.13. Análise de fósforo total na entrada da lagoa de retenção no evento 1 (08/12/18).

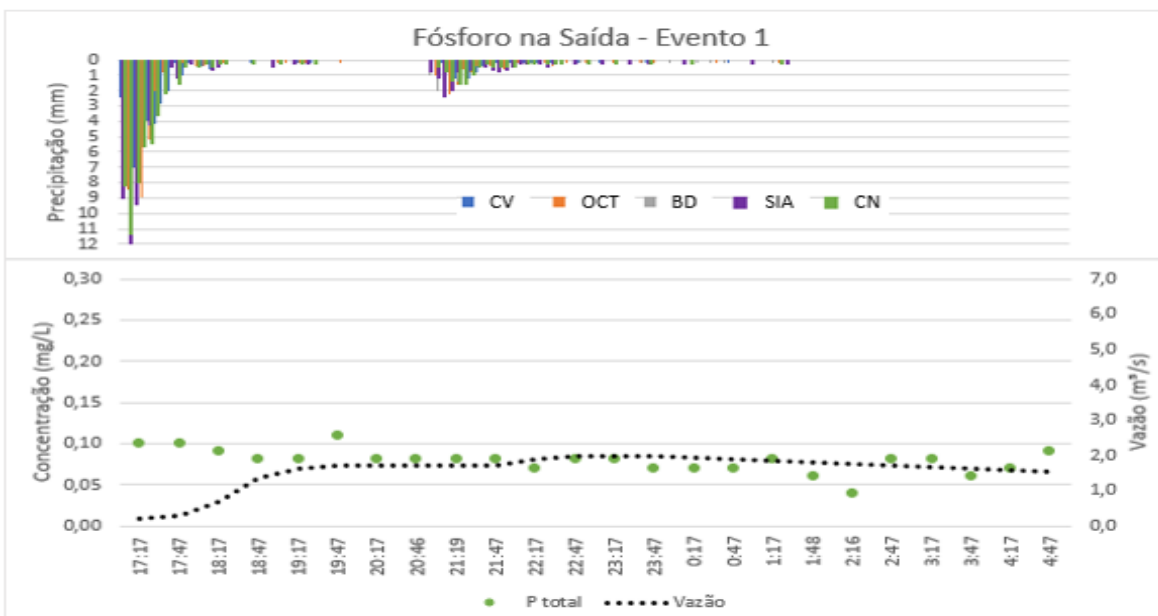


Figura 5.14. Análise de fósforo total na saída da lagoa de retenção no evento 1 (08/12/18 – 09/12/18).

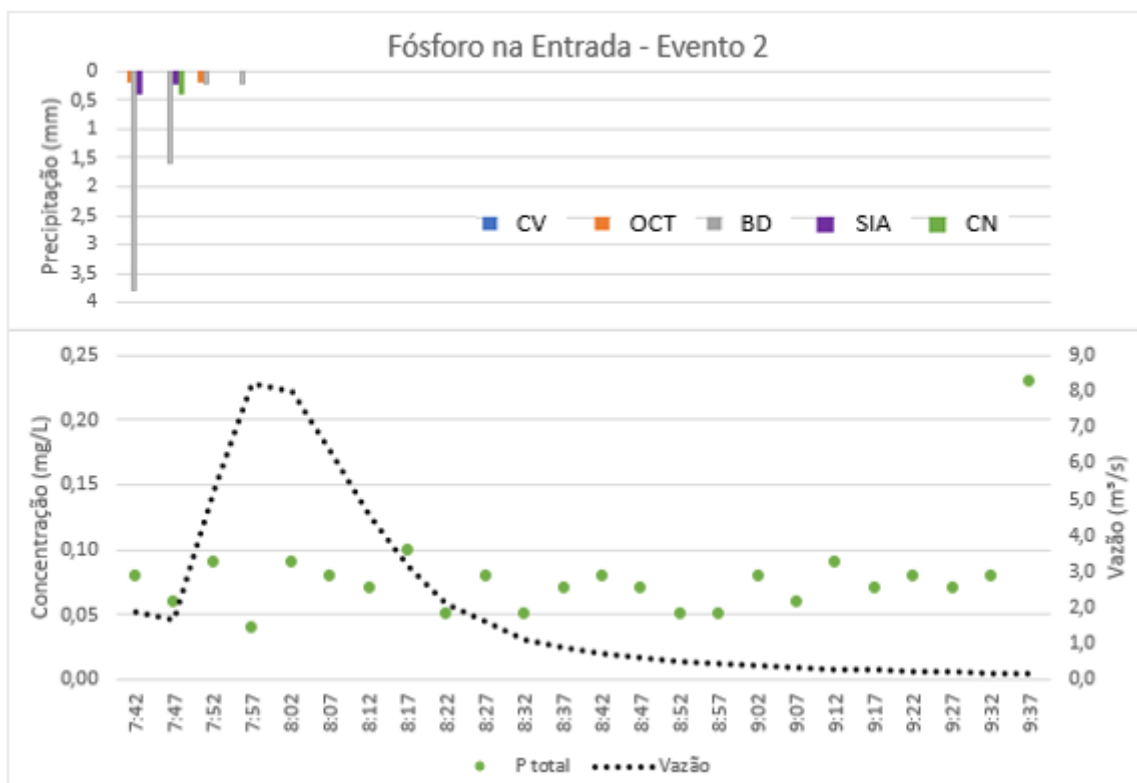


Figura 5.15. Análise de fósforo total na entrada da lagoa de retenção no evento 2 (25/02/19).

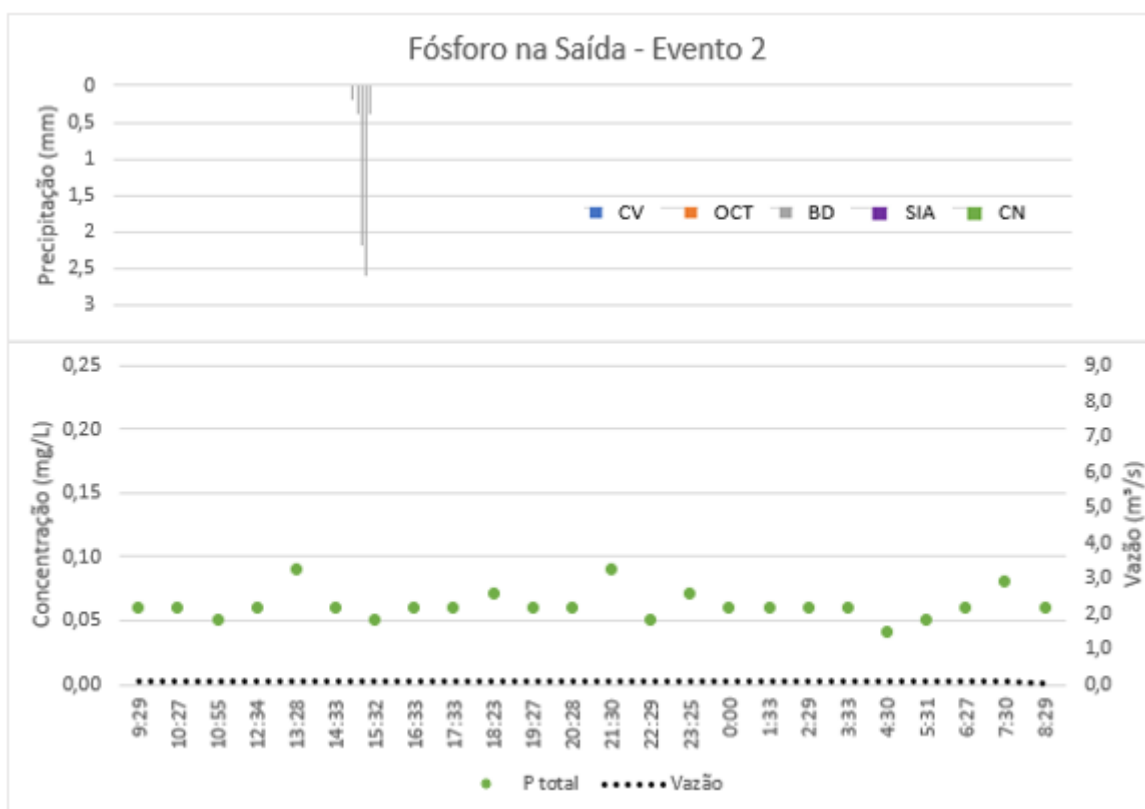


Figura 5.16. Análise de fósforo total na saída da lagoa de retenção no evento 2 (25/02/19 – 26/02/19).

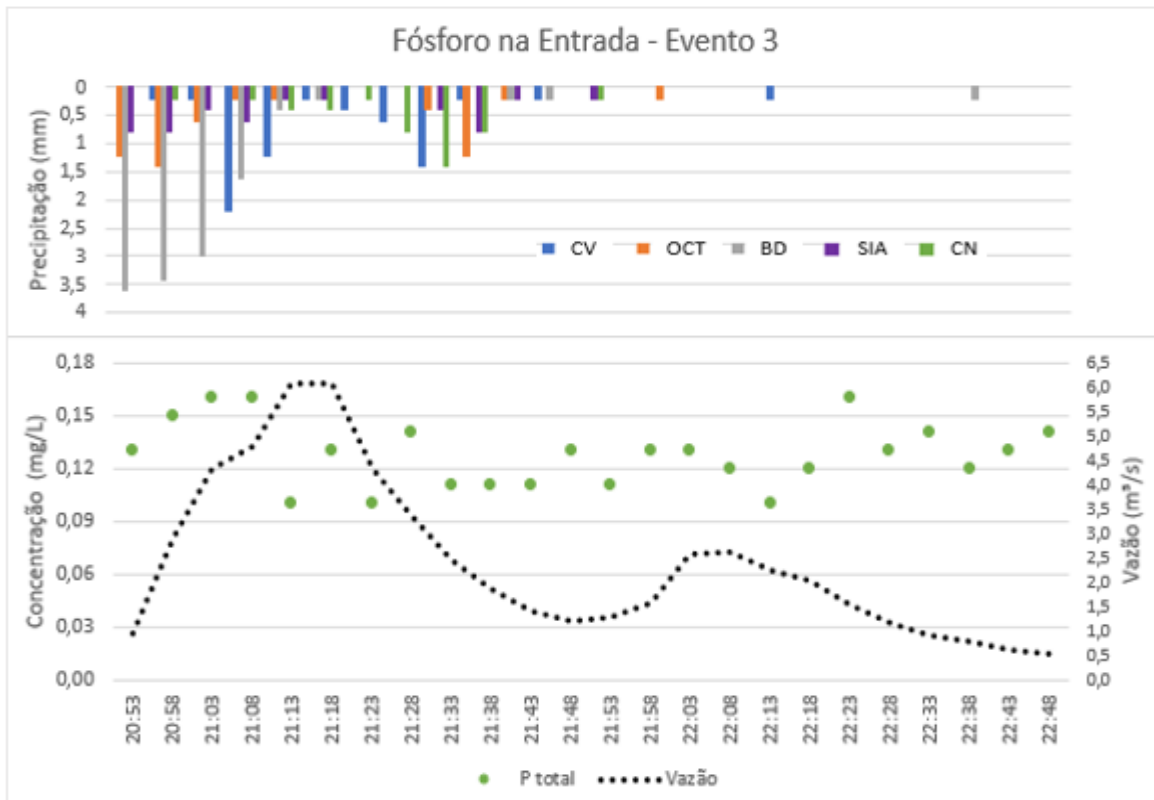


Figura 5.17. Análise de fósforo total na entrada da lagoa de detenção no evento 3 (16/03/19 – 17/03/19).

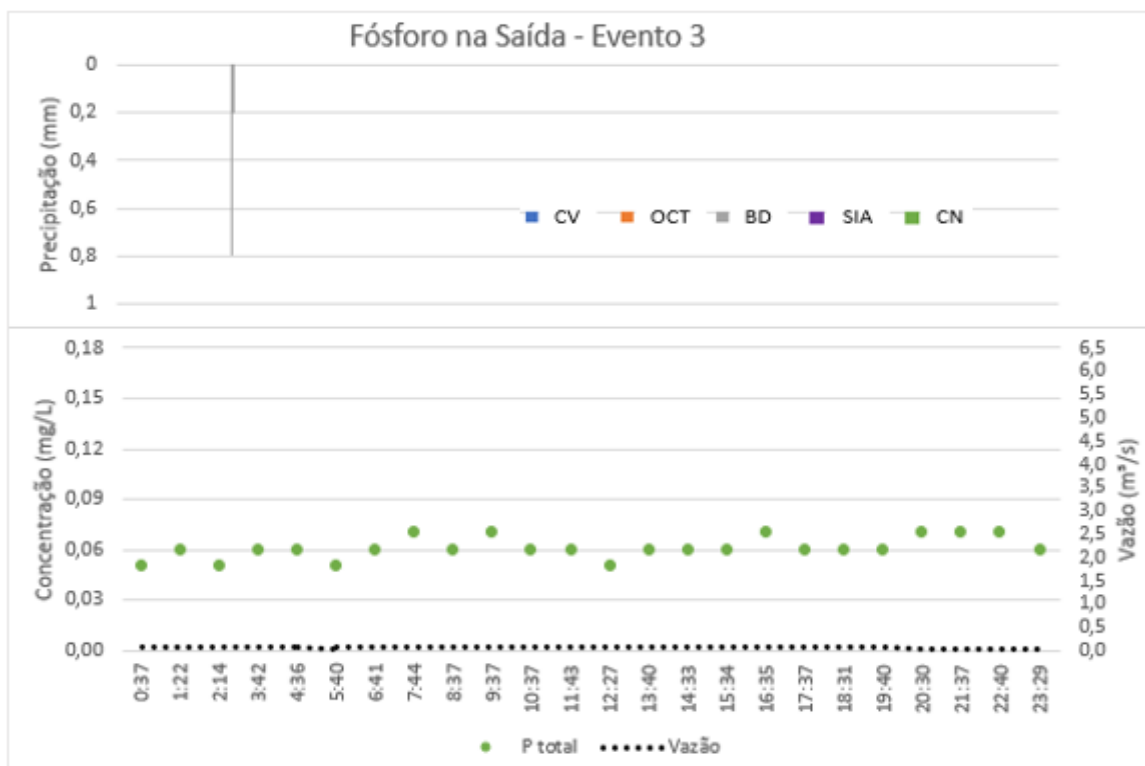


Figura 5.18. Análise de fósforo total na saída da lagoa de detenção no evento 3 (16/03/19 – 17/03/19).

Para os três eventos os valores de concentração de fósforo total pouco se alteraram. Isso pode ter acontecido por conta de lançamentos constantes de esgotos domésticos na galeria da rede de drenagem pluvial.

Comparando os polutogramas da entrada e saída da lagoa de detenção, para os três eventos, observa-se que a lagoa reduz as concentrações mais elevadas na entrada, mas não as concentrações baixas, sendo a concentração máxima na saída de 0,11 mg/L. Pelas concentrações máximas na entrada e na saída da lagoa (Tabela 5.5) verifica-se que houve um abatimento das concentrações de P total de, em média, 56%.

O evento 3 apresenta um menor volume de água que nos outros, fazendo com que a diluição do nutriente seja menor também, assim obtendo concentrações um pouco maiores que as observadas nos eventos 1 e 2.

Na Tabela 5.5 são apresentados os valores estatísticos das análises de fósforo total para os 3 eventos analisados, na entrada e na saída da lagoa. Pela tabela é mais fácil observar como os valores de concentração para cada evento foram similares, apesar das precipitações e vazões, para cada evento, serem distintos.

Tabela 5.5. Parâmetros estatísticos para as concentrações de P total na entrada e na saída.

	ENTRADA DA LAGOA			
	P total (mg/L)	P total (mg/L)	P total (mg/L)	P total (mg/L)
	Evento 1	Evento 2	Evento 3	Todos eventos
Média	0,09	0,08	0,13	0,10
Mediana	0,07	0,08	0,13	0,08
Mínimo	0,04	0,04	0,10	0,04
Máximo	0,25	0,23	0,16	0,25
Desvio	0,05	0,04	0,02	0,04
	SAÍDA DA LAGOA			
	P total (mg/L)	P total (mg/L)	P total (mg/L)	P total (mg/L)
	Evento 1	Evento 2	Evento 3	Todos eventos
Média	0,08	0,06	0,06	0,07
Mediana	0,08	0,06	0,06	0,06
Mínimo	0,04	0,04	0,05	0,04
Máximo	0,11	0,09	0,07	0,11
Desvio	0,01	0,01	0,01	0,01

A variação da concentração de fósforo total para o estudo foi de 0,04 a 0,25 mg/L, na entrada da lagoa de detenção. A sub-bacia do C.O. estudada por Costa (2013) apresentou um intervalo de 0,04 a 0,68 mg/L, e para a bacia do Iate os valores foram mais elevados, de 0,10 a 3,61 mg/L, por conta das diferenças de uso e ocupação do solo dessas bacias. A bacia do Riacho Fundo I, estudada por Tsuji (2018) apresentou um intervalo bem próximo da sub-bacia do C.O, com uma concentração mínima de 0,01 e máxima de 0,63 mg/L.

Diferentemente do que foi observado para o parâmetro nitrogênio, o fósforo total apresenta valores acima dos padrões estabelecidos pela Resolução nº CONAMA 357/2005, que estabelece 0,050 mg/L como a concentração máxima permitida para corpos hídricos de Classe II. Observando os valores máximos de concentração para a saída da lagoa verifica-se que os três eventos superam o limite de 0,050 mg/L.

Isso também foi observado no estudo de Gomes (2015) em que as concentrações de fósforo total ficaram acima do permitido pela Resolução em quatro dos oitos conjuntos de bacia de detenção analisados. Os conjuntos em desacordo com as condições foram: Recanto das Emas, Quadra 303 do Recanto das Emas, Setor O de Ceilândia e Santa Maria.

Assim verifica-se que as concentrações de fósforo total encontradas no escoamento pluvial do DF são mais preocupantes que as concentrações das formas de nitrogênio, mesmo porque o controle da eutrofização do Lago Paranoá é feito pelo controle de fósforo. Assim é importante levantar as cargas lançadas pelas bacias, mas de forma contínua.

5.4.2 Matéria orgânica

A origem da matéria orgânica (MO) no escoamento superficial advém dos resíduos orgânicos depositados sobre o solo e de descargas dos efluentes domésticos nas redes de drenagem pluvial. A indicação indireta da quantidade de matéria orgânica pode ser determinada pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) ou pela Demanda Química de Oxigênio (DQO). A DBO indica o potencial de oxidação da MO mediada por bactérias aeróbias, e a DQO corresponde ao consumo de oxigênio ocorrido em função da oxidação química da MO.

Só foi possível realizar a análise de DBO uma única vez. O equipamento disponível no Laboratório de Saneamento da UnB para o ensaio de DBO, o *BOD Trak* da HACH, só comporta 6 amostras de uma vez, conforme pode ser visto na Figura 5.19.



Figura 5.19. Equipamento de análise de DBO.

Foram selecionadas seis amostras do evento 3, do dia 16 e 17 de março de 2019, de acordo com os valores de DQO. Primeiramente, realizou-se a análise de DQO para as amostras. Com as análises de DQO realizadas, selecionaram-se cinco amostras da entrada da lagoa, sendo quatro com as concentrações de DQO mais altas (1G, 2G, 3G e 4G) e uma de DQO mais baixa (22G), e para a saída foi escolhida uma amostra com a DQO mais alta (1V).

A Tabela 5.6. apresenta os dados obtidos para as análises de DQO e DBO, e a relação DQO/DBO para essas seis amostras.

Tabela 5.6. Concentrações de DQO e DBO obtidas para o evento 1.

Amostra	DQO (mg/L)	DBO5 (mg/L)	DQO/DBO
1G	393	31,8	12,36
2G	211	23,0	9,17
3G	273	36,6	7,46
6G	155	15,0	10,33
22G	24	4,0	6,00
1V	155	17,5	8,86

Em comparação com a DBO, os valores de DQO foram bem mais elevados, assim parte dessa matéria orgânica pode estar associada à lavagem do solo ocasionado pelo escoamento superficial e pelos lançamentos de efluentes. Com os dados obtidos foi possível obter a relação DQO/DBO, para verificar a biodegradabilidade dessas amostras, apresentando

relações bem distintas de uma amostra para a outra, variando de 6 a 12,36, conforme pode ser visto na Tabela 5.6. De acordo com Giansante (2002) essa relação é uma forma de verificar a presença de esgoto doméstico bruto nos corpos hídricos e valores menores que 2 indicam elevada fração biodegradável. Von Sperling (1996) cita que para essa relação valores entre 1,7 e 2,4 apresentam resíduos que são biodegradáveis. Como todas relações foram maiores que 6 tem-se que uma pequena parte da matéria orgânica era biodegradável, podendo-se associar os altos valores de DQO à presença de outras formas de carbono, como combustíveis, óleos e graxas, o que já era esperado devido às rodovias que cortam a região e o Setor de Oficinas Sul.

Costa (2013) realizou a análise de DBO para algumas amostras pontuais no monitoramento da bacia do Centro Olímpico da UnB. Para duas amostras de um evento de fevereiro de 2013, obteve como valores de DQO 307 mg/L e 57 mg/L, e para DBO de 81 mg/L e 22 mg/L, respectivamente. A relação DQO/DBO para essas amostras é menor que as encontradas no projeto, mas também apresentam pequena parte biodegradável.

As condições de qualidade da água para o Córrego do Guará, pertencente a classe II do enquadramento, estabelece uma concentração máxima de DBO de 5 mg/L, de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005. As amostras que foram analisadas estão acima desse limite, com exceção da amostra de menor DQO (amostra 22 G, Tabela 5.6). A única amostra analisada para a saída da lagoa apresentou uma concentração de 17,5 mg/L, muito acima do valor permitido para o lançamento em um corpo hídrico de classe II.

Gomes (2015) avaliou que a bacia de detenção da RA Recanto das Emas obteve valores de DBO de, aproximadamente, 35 mg/L a montante da bacia e 55 mg/L no ponto de lançamento. A bacia de detenção de Samambaia apresentou 50 mg/L a montante da bacia, e no ponto de lançamento, aproximadamente, 40 mg/L. Entre os oito conjuntos, apenas o da RA Cruzeiro não apresentou, no lançamento, valores acima do permitido pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

Os dados permitem inferir algo sobre a proximidade da matéria orgânica de difícil degradação, mas não sobre a remoção de MO. Mesmo porque, em função do longo tempo de detenção é esperado que boa parte da MO em suspensão seja removida.

5.4.3 Coliformes

As bactérias do grupo coliforme são utilizadas como indicadores biológicos da qualidade das águas, as quais indicam contaminação das águas por fezes humanas e/ou de animal. Os

principais indicadores de contaminação fecal comumente utilizado são os coliformes totais, termotolerantes e *Escherichia coli*.

A determinação dos coliformes é baseada em termos probabilísticos, sendo o resultado expresso através do número mais provável (NMP) de organismos do grupo coliformes por 100 mL de amostra.

Para o evento 3 (Tabela 5.2) realizou-se a primeira análise de coliformes para cinco amostras, selecionando as três amostras de DQO mais alta da entrada (1G, 2G, 3G) e uma da saída (1V), e a com DQO mais baixa da entrada (22G). O método utilizado para a análise foi o Colilert e não foi feita a diluição das amostras, fazendo com que os resultados ultrapasassem o intervalo de detecção. Assim só se sabe que os valores das amostras foram maiores que 2419,6 NMP/100mL tanto para coliformes totais, quanto para fecais, com exceção da amostra da saída da lagoa que não ultrapassou o intervalo de detecção para os coliformes fecais, apresentando 201,4 NMP/100mL. Portanto, a lagoa foi capaz de reduzir a quantidade de coliformes fecais presentes, o que é esperado em função das dimensões, profundidade e tempo de detenção.

Como para o evento 3 as análises feitas ultrapasaram o limite de detecção, foi feita uma coleta, no dia 28 de março de 2019, com o objetivo de descobrir qual diluição seria eficiente para as próximas análises. Assim foi recolhida uma amostra de água na entrada da lagoa e outra na saída, que apresentava vazão. Foram realizadas três análises, variando a diluição, para cada uma das amostras: sem diluição, com diluição 1:100 e 1:1000. Novamente, as amostras que não foram diluídas, assim como no evento 3, ultrapasaram o limite de detecção para coliformes totais, e para fecais apenas a amostra da saída da lagoa ficou dentro do limite com um valor de 78,9 NMP/100 ml, mais uma vez comprovando que a lagoa diminui a concentração de coliformes fecais. Foi selecionada para as próximas análises a diluição 1:100 que ficou dentro do limite de detecção.

Para a próxima coleta foi realizada uma saída de campo à lagoa, no dia 06 de abril de 2019, para programar os amostradores. Como a saída da lagoa se apresentava com vazão, o amostrador desse local foi programado para começar a coleta às 18h desse mesmo dia, pois estava prevista chuva. Porém a chuva só ocorreu no dia 07 de abril, com a onda de cheia chegando na lagoa pelas 13h, acionando o amostrador da entrada. Foram analisadas as quatro primeiras amostras recolhidas na entrada e as duas primeiras da saída. As amostras foram diluídas (diluição 1:100) e ainda assim as amostras da entrada ultrapasaram o limite de detecção para coliformes totais, apresentando valores maiores de 441.960 NMP/100 ml. Já

para coliformes fecais os valores variaram de 12.670 a 41.060 NMP/100ml. Na saída da lagoa a primeira amostra obteve valores de 11.870 NMP/100 ml e 100 NMP/100 ml, para coliformes totais e fecais, respectivamente, e para a segunda amostra de 24.810 NMP/100 ml para totais e um valor menor que 100 NMP/100 ml para fecais.

Os altos valores encontrados para coliformes indicam a provável contaminação das águas por esgoto domésticos, comprovando a possibilidade de ligações irregulares de esgoto sanitário na rede de drenagem. Mas ainda foi realizada uma última análise no começo do período da seca, no dia 15 de maio de 2019. Essa última coleta foi feita no meio das três câmaras da galeria que chegam na lagoa de detenção e em um poço de visita mais a montante da lagoa. Foi selecionado um poço de visita que passa dentro da NOVACAP e verificou-se que havia um fluxo de efluente constante passando por esse poço de visita no momento da coleta. Como para a análise do dia 6 de abril os resultados ainda ultrapassaram o limite de detecção, para essa última análise adotou-se uma diluição de 1:1.000 para as amostras. Os resultados para as três câmaras da galeria variaram de 41.400 a 60.200 NMP/100 ml para coliformes totais e 1.000 NMP/100 ml para fecais. A coleta realizada no poço de visita ultrapassou o limite de detecção para coliformes totais, sendo maior que 2.419.600 NMP/100 ml, e para coliformes fecais também apresentou um valor muito alto, de 46.400 NMP/100 ml. A Figura 5.20 mostra a diferença das cartelas de análise para uma amostra feita na entrada da lagoa e a do poço de visita.

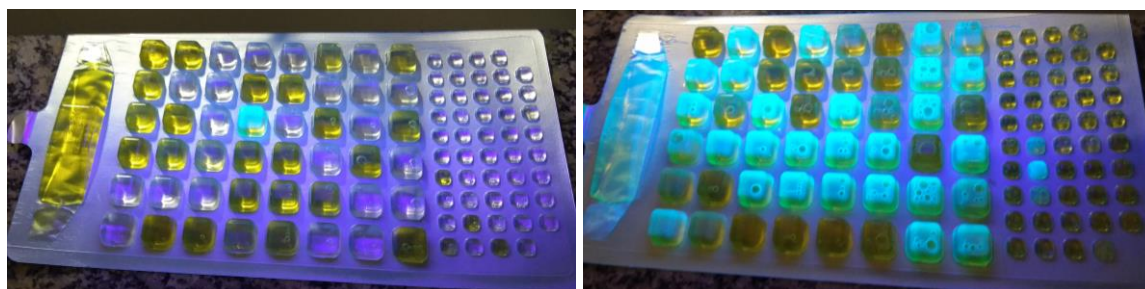


Figura 5.20. Cartelas de análise de coliformes para a amostra da câmara 1 (foto da esquerda) e a amostra recolhida no poço de visita (foto da direita).

Na Figura 5.20 as cavidades com cor amarelada representam os valores positivos para coliformes totais, e as cavidades com uma luminescência azul (que são detectadas utilizando uma luz UV) representam os coliformes fecais. Como a cartela do poço de visita apresentou todas as cavidades em amarelo, sem a luz UV, tem-se que essa ultrapassou os limites de detecção para coliformes totais.

Com a realização dessa última coleta pode-se concluir que as amostras recolhidas na entrada da lagoa apresentam valores mais baixos para coliformes por estarem diluídas na água

acumulada presente nessa área. Como o poço de visita apresentava um fluxo de água e obteve valores tão altos para coliformes, durante o período da seca, fica evidente que há ligações irregulares de efluentes sanitários. As características do esgoto doméstico para o DF apresentam concentrações de coliformes totais variando de 10^6 a 10^8 NMP/100 ml (CAESB, 2016). O valor de concentração encontrado para o poço de visita está dentro dessa faixa.

Pelas análises feitas percebeu-se que a lagoa de retenção apresenta uma certa eficiência para diminuir a concentração de coliformes totais e fecais, mas não foi possível saber quanto foi essa redução para coliformes totais. Para fecais verificou-se uma eficiência de redução maior que 90%.

5.5 MODELAGEM CHUVA-VAZÃO

A modelagem hidráulica e hidrológica foi realizada utilizando o programa PCSWMM. Para verificar e melhorar a qualidade das simulações foram realizadas etapas de calibração e verificação a fim de analisar a qualidade das simulações. Desse modo, primeiramente realizou-se a simulação dos três eventos monitorados com os dados de precipitação e vazão observados, em seguida calibraram-se os três eventos para se obter a melhor configuração da calibração e, por fim, foi realizada nova simulação para os três eventos utilizando o conjunto de parâmetros que levou à melhor calibração.

5.5.1 Simulações dos eventos sem calibração

A simulação foi realizada para os três eventos em análise adicionando os dados de precipitação registrados pelos cinco pluviógrafos, de acordo com a divisão feita pelo método de Thiessen, e os hidrogramas observados na entrada e na saída da lagoa de retenção. Com os dados observados adicionados foi possível verificar a eficiência do modelo pelos parâmetros R^2 e NSE, apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7. Parâmetros da eficiência do modelo para cada evento simulado.

	Evento 1		Evento 2		Evento 3	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
NSE	- 0,0333	-2,75	- 0,371	0,735	- 1,92	- 2,44
R^2	0,931	0,983	0,786	0,957	0,814	0,924

Pelos valores da Tabela 5.7 tem-se que o evento mais bem representado foi o evento 1, ainda que tenha apresentados valores de NSE abaixo de zero, apresentou os maiores valores para R^2 , estando muito próximos de 1. A Figura 5.21 mostra a simulação realizada para o evento

1, onde observa-se que o formato do hidrograma foi bem representado seguindo o mesmo comportamento das vazões observadas, mas a vazão de pico foi superestimada em 60% para a entrada da lagoa, e em 114% para a saída da lagoa. Os valores de pico superestimados pela simulação justificam os baixos valores de NSE. Mas ainda assim o modelo respondeu bem aos dados observados, tendo em vista que consegue reagir aos eventos de precipitação na lagoa, porém, podem ser melhorados com a calibração.

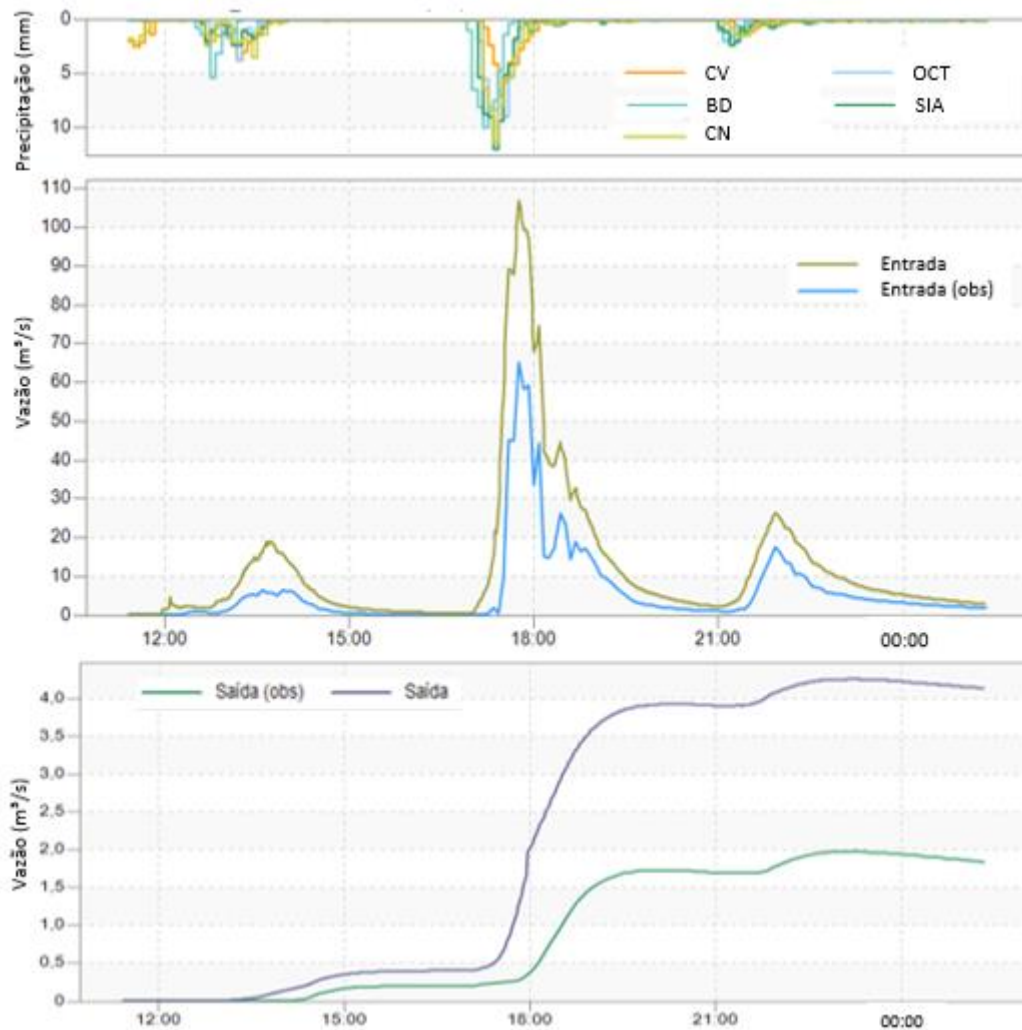


Figura 5.21. Simulação do evento 1.

As simulações realizadas para o evento 2 e 3 não apresentaram bons resultados comparando com o observado, gerando valores de R^2 menores que o evento 1, mas mantiveram a superestimação da vazão que ocorreu para a simulação do evento 1.

5.5.2 Calibração

Foi realizada a calibração do modelo para os três eventos simulados para verificar qual apresentaria melhores valores de eficiência, representando melhor a realidade. Então para o modelo se ajustar melhor à área de estudo, no processo de calibração, foram alterados cinco

parâmetros aos quais foram atribuídas porcentagens de incerteza. A Tabela 5.8 apresenta os valores definidos para as incertezas, e as alterações efetuadas de fato durante a calibração.

Tabela 5.8. Incertezas definidas para cada parâmetro e as alterações feitas na calibração.

Parâmetro	Incertezas	Alterações		
		Evento 1	Evento 2	Evento 3
Área das sub-bacias	5 %	- 5 %	- 5 %	-5 %
Largura das sub-bacias	50 %	38 %	- 50 %	- 50 %
Armazenamento em depressões	50 %	47 %	47,5 %	49,5 %
Rugosidade dos canais	20 %	20 %	19,8 %	19,8 %
Curva número (CN)	10 %	- 10 %	- 10 %	-10 %

A simulação realizada para a saída da lagoa de retenção não considera o tamanho da lagoa, o curto circuito e o caminho preferencial da água que ocorre na lagoa de retenção, e por conta disso, os parâmetros dados para a saída não foram considerados para a calibração. Assim alteraram-se os parâmetros, para a melhor calibração, considerando apenas os dados da entrada da lagoa.

Em relação a sensibilidade das simulações com as alterações realizadas em cada parâmetro observou-se durante a calibração que o parâmetro menos sensível foi o armazenamento em depressões permeáveis, enquanto os demais apresentaram grande sensibilidade.

Entre as três calibrações, aquela realizada para o evento 1 apresentou melhor eficiência aumentando o valor de R^2 para 0,955 e do NSE para 0,322. Porém não foi possível diminuir muito as superestimações dos picos de vazão dentro das incertezas definidas, como pode ser visto na Figura 5.22.

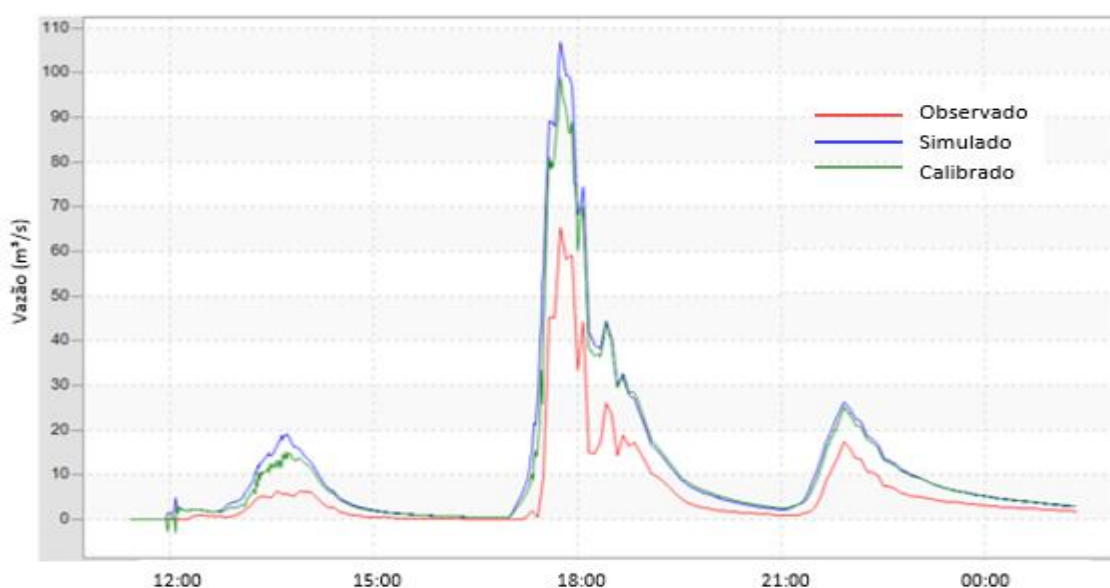


Figura 5.22. Comparação dos hidrogramas para o evento 1.

5.5.3 Simulação dos eventos com o melhor conjunto de parâmetros

Após a calibração foram realizadas novas simulações para os demais eventos utilizando os parâmetros obtidos com a melhor calibração por evento. Desse modo os três eventos foram simulados novamente e analisaram-se novamente as métricas de eficiência dadas em relações aos dados observados. As simulações após a calibração foram melhores, aumentando os valores para os parâmetros R^2 e NSE em todos os eventos (Tabela 5.9), tanto para a entrada como para a saída da lagoa.

Tabela 5.9. Eficiência do modelo pré e pós calibração para os eventos simulados.

	Evento 1		Evento 2		Evento 3	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
NSE, pré calibração	- 0,0333	-2,75	- 0,371	0,735	- 1,92	- 2,44
NSE, pós calibração	0,276	-2,15	0,0672	0,977	- 0,986	- 0,589
R^2 , pré calibração	0,931	0,983	0,786	0,957	0,814	0,924
R^2 , pós calibração	0,944	0,988	0,843	0,982	0,851	0,93

As Figuras 5.23 e 5.24 mostram os hidrogramas simulados após a calibração, para a verificação, no evento 2 e no evento 3.

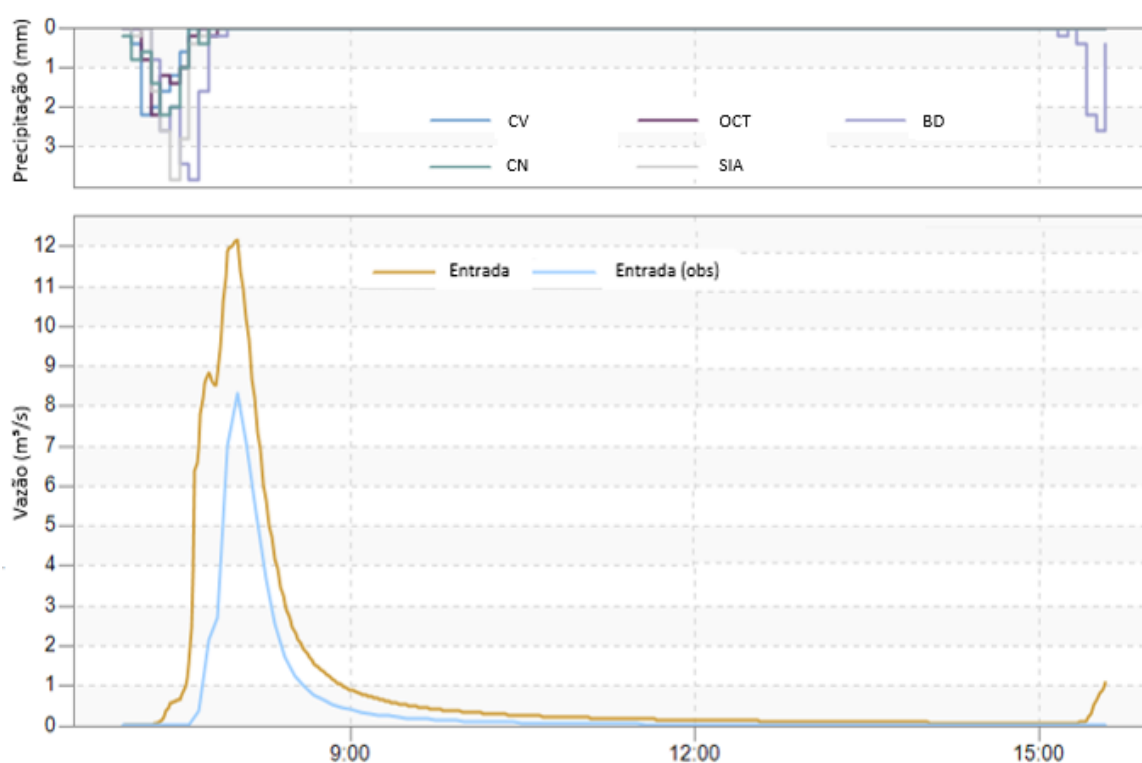


Figura 5.23. Hidrograma calibrado na entrada da lagoa do evento 2.

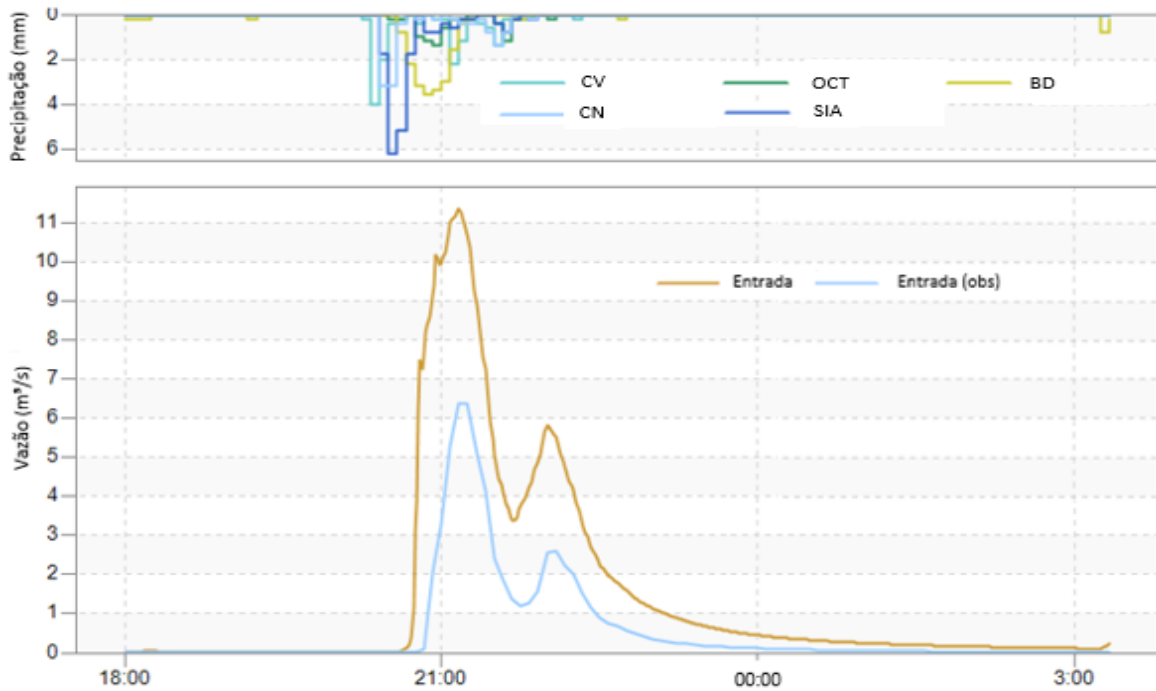


Figura 5.24. Hidrograma calibrado da entrada na lagoa do evento 3.

Nesses dois eventos, apesar de não terem apresentado bom ajuste em termos dos indicadores, percebe-se que o modelo gerou vazões consistentes, apresentando maiores problemas nos valores da vazão de pico assim como no primeiro evento. As pequenas diferenças nos formatos do hidrograma observado e simulado podem ter ocorrido pela variabilidade da distribuição espacial das precipitações, pois o modelo tende a gerar simulações mais próximas do observado quando a distribuição espacial é mais uniforme.

5.5.4 Comportamento da rede de drenagem e da lagoa de retenção

Durante as simulações realizadas fica clara a alta eficiência do amortecimento dos picos de vazão de cheia proporcionada pela lagoa de retenção, como já foi visto nos hidrogramas observados. Pela Figura 5.21 que apresenta a simulação do evento 1, que é o mais crítico entre os três eventos analisados, observa-se que a vazão máxima simulada na entrada da lagoa foi de 107 m³/s, enquanto que na saída foi de 4,26 m³/s, resultando em um amortecimento de 96%.

O evento 2 apresentou uma vazão afluente máxima simulada de 12,18 m³/s e vazão efluente máxima de 0,11 m³/s, apresentando um amortecimento de 99% realizado pela lagoa de retenção. O evento 3 também apresenta um amortecimento grande, de 98,7% com vazão afluente máxima de 11,38 m³/s e efluente de 0,15 m³/s. Assim como nos hidrogramas observados apresentados no item 5.3, as vazões simuladas também estão de acordo com a vazão de pré-desenvolvimento preconizada pela Resolução nº 9/2011 da Adasa.

O programa PCSWMM também indica os problemas que podem ter ocorrido na rede de drenagem com a simulação de um evento, como por exemplo, mostrar pontos em que ocorrem extravasamento durante o evento. A Figura 5.25 apresenta os poços de visita em que ocorreu extravasamento durante o evento 1, que foi um evento que apresentou tempos de retorno acima de 20 anos, sendo esperado, portanto, que poderia haver problemas na rede de drenagem. Volken (2018) realizou essa análise com uma chuva de projeto construída com a curva IDF do PDDU, com tempo de retorno de 10 anos e duração de 24 horas, para essa rede de drenagem e, comparando as simulações, observa-se que a maioria dos PVS problemáticos são os mesmos, pois se localizam em áreas com alto índice de impermeabilização do solo, que geram um maior escoamento superficial que é direcionado para as redes de drenagem, que não é capaz de drenar toda essa vazão. Os eventos 2 e 3 não apresentaram uma quantidade crítica de poços de visita, com extravasamento em menos de 20 poços.

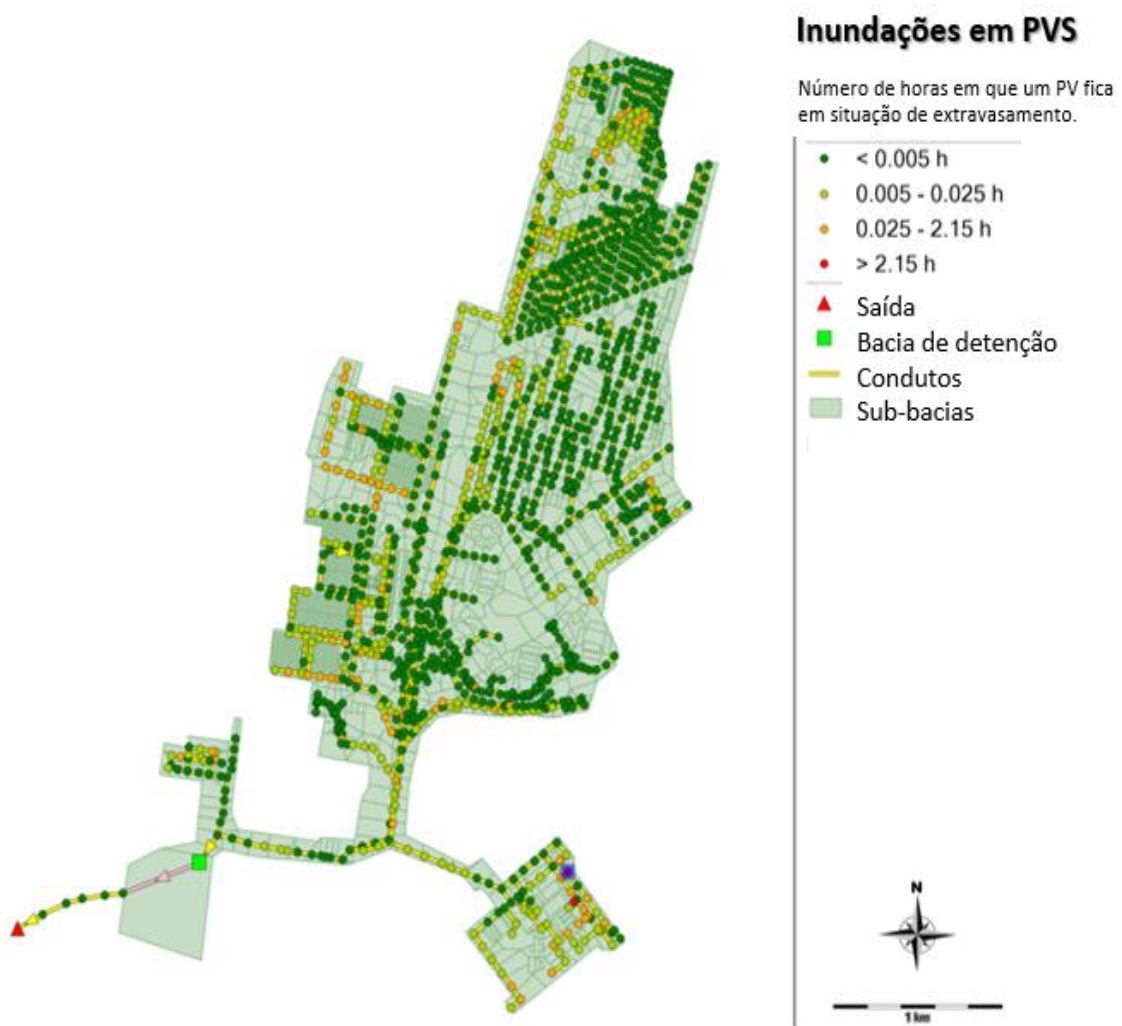


Figura 5.25. Poços de visita em que ocorreu extravasamento para o evento 1.

5.6 MODELAGEM DOS POLUENTES

Para a simulação de qualidade foram utilizados os dados obtidos pelas análises e monitoramento dos parâmetros: nitrogênio total e fósforo total. Utilizou-se como base para as simulações o modelo que foi calibrado nas simulações de quantidade, para se obter valores de poluentes mais confiáveis.

Com os dados das análises ajustou-se uma curva empírica para os parâmetros de qualidade, plotando os valores de fluxo de massa do Ptotal e Ntotal (mg/s) com as vazões correspondentes, para se obter os coeficientes da função exponencial para a lavagem dos poluentes. Esse processo permite a inserção de diferentes equações para cada tipo de uso do solo, porém nesse trabalho utilizou-se uma equação geral para cada poluente, sem separar por diferentes usos do solo. A curva obtida para Ntotal é apresentada na Figura 5.26 e para Ptotal na Figura 5.27. Para nitrogênio total encontrou-se o $C1=170,24$ e o $C2=1,112$, e para o fósforo total obteve-se $C1=88,96$ e $C2=0,972$. Enquanto para o acúmulo de poluentes foram utilizados os valores levantados por Costa (2013) que foram apresentados no item 4.3.4 deste trabalho.

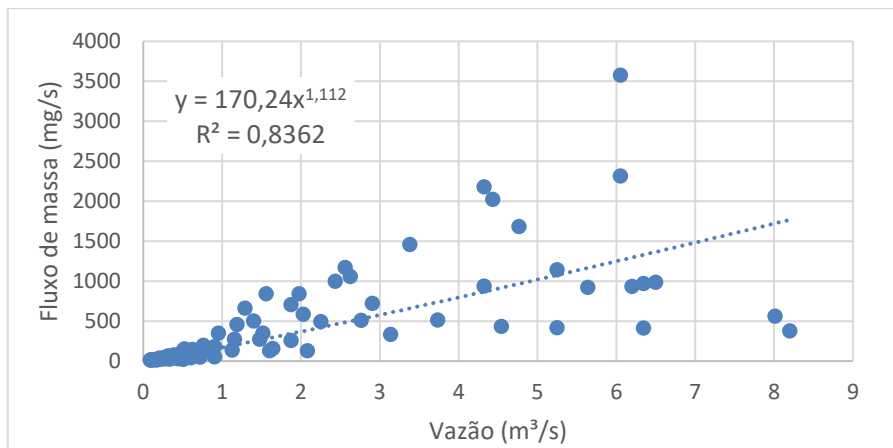


Figura 5.26. Curva empírica para o nitrogênio total considerando todos eventos.

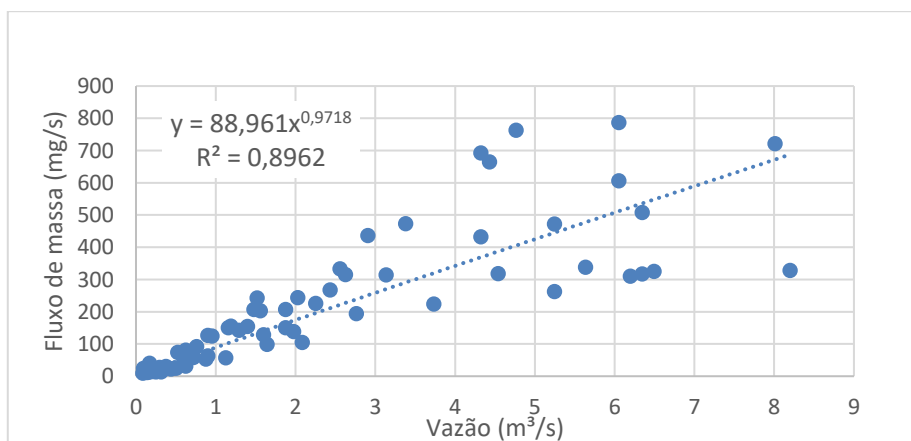


Figura 5.27. Curva empírica para o fósforo total considerando todos eventos.

Para a obtenção dos valores de fluxo de massa apenas multiplicaram-se as concentrações dos poluentes (mg/L) pelas vazões correspondentes.

Com as funções para *wash off* e *build up* inseridas no programa PCSWMM foram simulados os três eventos para verificar o comportamento do modelo com os poluentes. A Tabela 5.10 apresenta a eficiência do modelo para os três eventos e os dois parâmetros simulados.

Tabela 5.10. Eficiência do modelo SWMM para as simulações de qualidade.

		Evento 1	Evento 2	Evento 3
N total	NSE	- 3,86	- 4,83	- 6,89
	R ²	0,638	0,02	0,04
P total	NSE	- 2,33	- 3,12	- 12,6
	R ²	0,0002	0,02	0,01

A Figura 5.28 apresenta a simulação de nitrogênio total para o evento 1, que entre os três apresentou melhores valores para R² e NSE. A Figura 5.29 apresenta a simulação de fósforo total para o evento 1.

Observando os valores de eficiência (Tabela 5.10) e as Figuras 5.28 e 5.29 conclui-se que o modelo não conseguiu simular o comportamento das concentrações de N e P, apresentando valores subestimados de concentração e o pico ocorrendo antes do observado. O que pode ter contribuído para esse resultado é o fato de que não foram realizados os procedimentos recomendados para a obtenção dos coeficientes de *build up*, e foram utilizados valores obtidos em outro estudo. Da mesma forma, para o processo de lavagem de poluentes foi considerada uma equação geral para todos os tipos de uso do solo, o que pode ter influenciado para a ineficiência do modelo em relação aos dados observados.

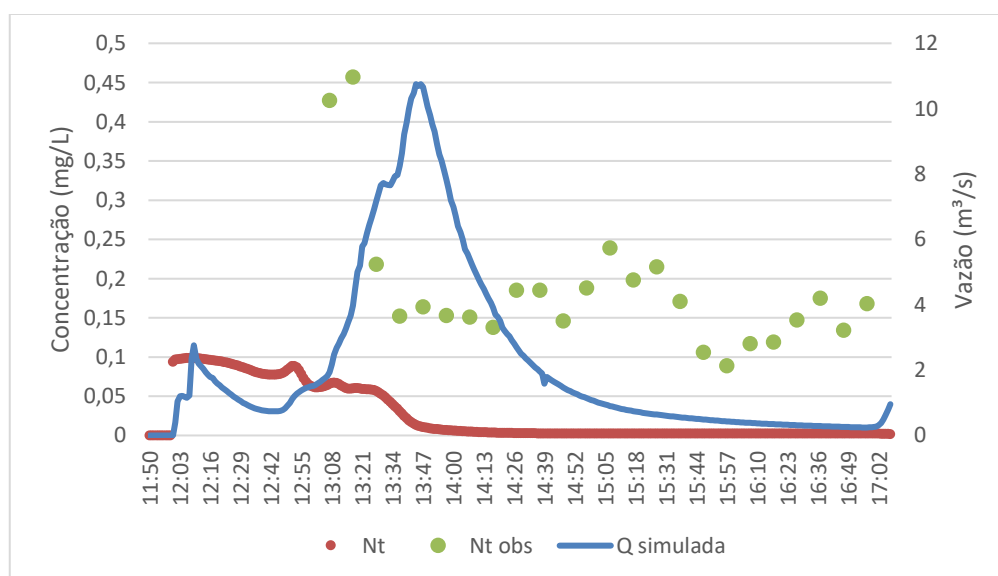


Figura 5.28. Simulação de Ntotal para o evento 1.

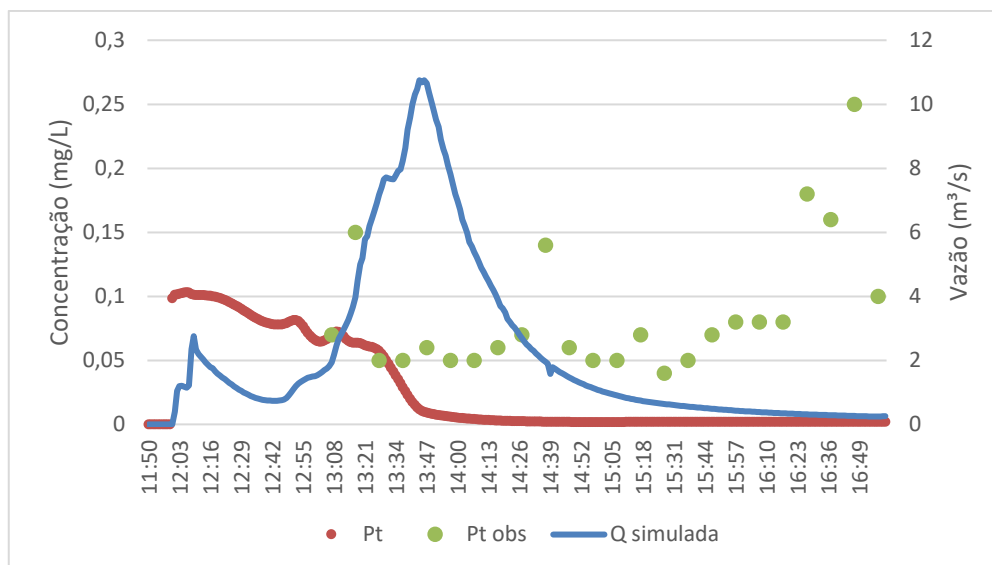


Figura 5.29. Simulação de Ptotal para o evento 1.

Para uma melhor visualização também foram feitos os gráficos em função da carga dos poluentes, apenas para o intervalo de tempo que há os valores observados. As Figuras 5.30 e 5.31 mostram esses gráficos para N total e P total, também do evento 1.

Assim como observado nos gráficos referentes às concentrações dos poluentes (Figura 5.28 e 5.29), em termos de carga, o modelo não reproduz bem os valores observados, mas a forma da curva é semelhante.

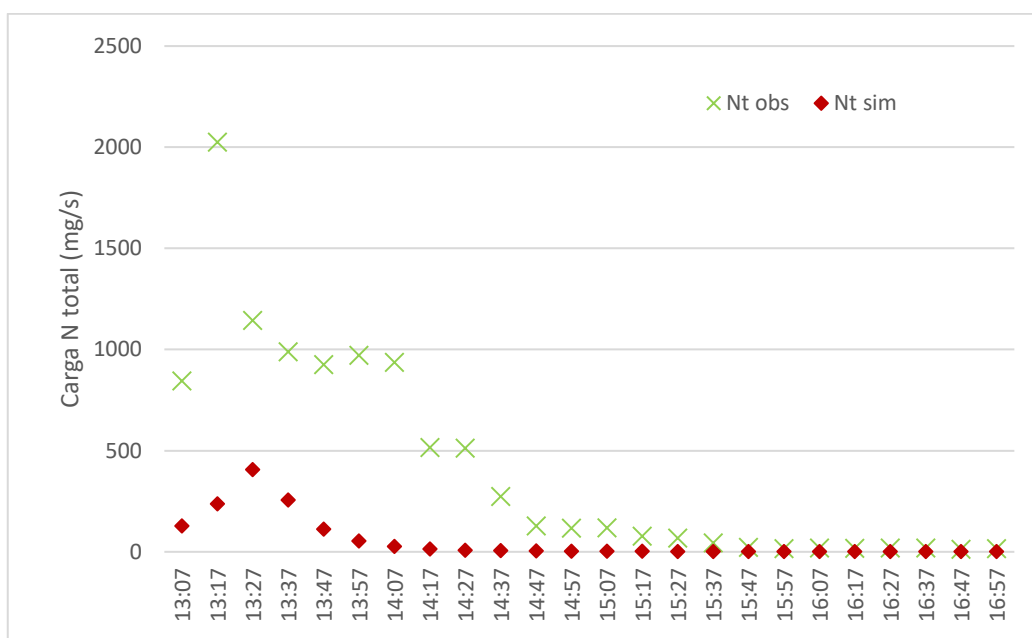


Figura 5.30. Carga de N total observada e simulada para o evento 1.

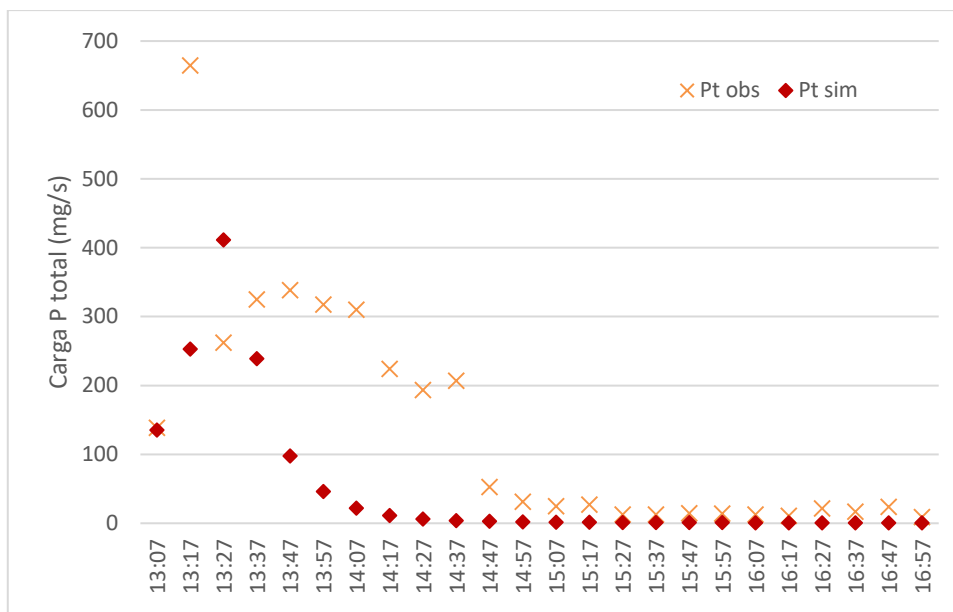


Figura 5.31. Carga de P total observada e simulada para o evento 1.

Tsuji (2018) também obteve valores de eficiência baixos para as simulações de N total e P total, e verificou que as concentrações simuladas não apresentam as variações ao longo do tempo e as concentrações foram subestimadas. Mesmo após a calibração não obteve valores de eficiência muito melhores.

Souza (2014) obteve um bom desempenho da curva gerada pelo modelo, com valores de R^2 acima de 0,85 e valores de NSE positivos, porém realizou as simulações para as três formas de nitrogênio, nitrato, nitrito e amônia, e não para o N total, o que pode ter influenciado para um melhor resultado. Já em relação ao fósforo, o modelo apresentou pouca eficiência em representar as concentrações reais do evento, com valores negativos de NSE e R^2 insatisfatório, assim como o observado nesse projeto.

Assim como foi realizada a calibração para os parâmetros de quantidade, seria recomendado fazer a calibração para a qualidade, para tentar melhorar o modelo, porém essa não foi realizada neste trabalho.

6. CONCLUSÃO

O monitoramento quali-quantitativo realizado na área de estudo permitiu obter-se dados importantes para a compreensão do comportamento da lagoa de retenção do Guará, tendo sido registradas as ondas de cheia na entrada da lagoa e o amortecimento realizado, assim como o comportamento das concentrações dos poluentes nas águas pluviais.

Com os cinco pluviógrafos instalados pela área de estudo foi possível verificar a variabilidade espacial da chuva, que é uma característica de Brasília, e obter dados mais significativos para as simulações. A construção da curva-chave e os dados de nível da água também foram importantes para se obter as vazões afluentes e efluentes da lagoa e assim conseguir analisar o amortecimento das vazões, mostrando que a lagoa é muito eficiente nesse aspecto, por conta de seu grande volume. Verificou-se que as vazões efluentes atendem com muita folga a vazão de pré-desenvolvimento preconizada pela Resolução nº 9/2011 da Adasa. Esse amortecimento também foi verificado durante as simulações realizadas no PCSWMM.

Em relação à qualidade das águas pluviais verificou-se que o parâmetro nitrogênio, observado nas formas de nitrito, nitrato e amônia, não apresenta concentrações elevadas, não sendo preocupantes de acordo com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

Já para o fósforo observou-se concentrações mais altas, acima dos limites estabelecidos pela resolução CONAMA. A lagoa de retenção não foi eficiente em remover os nutrientes, apesar de conseguir reduzir um pouco as concentrações.

As amostras analisadas apresentam pequena relação DBO/DQO, o que pode estar relacionado com a presença de óleos, graxas e outras formas de matéria orgânica mais estável nas águas pluviais. A DBO também apresentou concentrações altas e em desacordo com o preconizado pela resolução CONAMA.

Foram encontradas altas concentrações de coliformes totais e fecais para o escoamento pluvial que chega na lagoa de retenção, indicando que há ligações irregulares de esgotos na rede de drenagem pluvial. As concentrações encontradas para os nutrientes e a matéria orgânica já indicavam que poderia haver ligações irregulares de esgotos, e a análise de coliformes confirma a presença de matéria fecal nas águas de galeria.

Para esses parâmetros de qualidade analisados a lagoa de retenção não teve grande impacto, mesmo com a presença da vegetação dentro da grande parte da lagoa. Esse comportamento pode estar relacionado com o curto circuito, visualmente observável, que ocorre dentro da lagoa, onde a água segue um caminho preferencial direto da entrada para a saída da lagoa.

Em relação à modelagem, o modelo simulou bem as vazões afluentes e efluentes da lagoa, obtendo-se valores de R^2 acima de 0,9 e valores positivos para NSE, após a calibração. Já para as simulações feitas para os parâmetros de qualidade, N total e P total, o PCSWMM não obteve bons resultados.

Para melhoria na qualidade da água a área lagoa poderia receber barreiras que atuassem como chicanas fazendo com que a lagoa atuasse como uma bacia de retenção. Assim seria interessante que fossem realizados estudos para verificar como a bacia poderia ser alterada para melhorar a qualidade da água drenada.

Outra recomendação seria realizar estudos para verificar a viabilidade para que a lagoa de retenção recebesse uma área maior de contribuição, pois ela apresenta um amortecimento muito alto dos picos de vazão de cheia, e assim suportaria receber a drenagem de mais locais, da região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adasa – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. (2011). Resolução n.º 9 de 08 de abril de 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. Diário Oficial do Distrito Federal. Brasília, 11 de abril de 2011.
- 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.
- Aguiar, C. R., Mitsuko, T. T., Carvalho, D. J., Costa, M. E. L., Koide, S. (2018). “Análise dos polutogramas para um evento chuvoso numa galeria de drenagem pluvial.” In: *XII Encontro Nacional de Águas Urbanas*, Maceió, Brasil.
- Ahlman, S. (2006). *Modelling of Substance Flows in Urban Drainage Systems*. Thesis for The Degree Of Doctor of Department of Civil and Environmental Engineering. Chalmers University Of Technology.. Goteborg, Swedes. 90p.
- Alvarez, R. P. P. (2010). *Estudo Experimental e Teóricos 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, 56p.
- Assunção, V. R. D. A. (2012). *Proposta de Metodologia de Cálculo para Reservatórios de Detenção em Bacias Hidrográficas Urbanizadas*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 170p.
- Banks, J. C., Camp, J. V., e Abkowitz, M. D. (2014). “Adaptation planning for floods: A review of available tools.” *Nat. Hazards*, **70**(2), 1327–1337.
- Baptista, M. B., Nascimento, N. O. e Barraud, S. (2011). *Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*. 2 ed. ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 318p.
- Batista, D. M. D. (2019). Estudo das Cargas de Sólidos Suspensos Provenientes da Poluição Difusa e Influência da Bacia de Detenção do Guará II – DF. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 62p.
- Beling, F. A. (2013). *Análise do desempenho do modelo SWMM5 acoplado ao calibrador PEST na bacia do Arroio Cancela/RS*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 154p.
- Berque, J.M., Ruperd, Y. (coordenadores). (2000). Stormater retention basins. Rotterdam: A. A. Balkema.
- Blumensaat, F., Wolfram, M. E. e Krebs, P. (2012). “Sewermodeldevelopment under minimum data requirements.” *Environmental Earth Science*, **65**(5), 1427–1437.
- Borris, M., Viklander, M., Gustafsson, A. M., e Marsalek, J. (2014). “Modelling the effects of changes in rainfall event characteristics on TSS loads in urban runoff.” *Hydrological Processes*, **28**(4), 1787–1796.

- BRASIL. (2005). Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional. Diário Oficial da União. Brasília, 18 de março de 2005.
- BRASIL. (2007). Lei Federal nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário Oficial da União. Brasília, 08 de janeiro de 2007.
- BRASIL. (2016). Lei Federal nº 13.308, de 06 de julho de 2016. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, determinando a manutenção preventiva das redes de drenagem pluvial. Diário Oficial da União. Brasília, 07 de julho de 2016.
- CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (2016). Relatório de indicadores de desempenho da CAESB. Brasília, DF, 183p.
- Campana, N. A., Bernardes, R. . e Silva, J. A. (2007) “ Controle qualitativo e quantitativo do escoamento pluvial urbano com bacias de detenção”. *Revista Ambiente e Água*, **2**(3), 98-111.
- Campos, J. E. G. (2004). “Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos”. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**(1), 41-48.
- Canholi, A. P. (2005). Drenagem urbana e controle de enchentes. 1ª ed. Oficina de Textos, São Paulo, 302 p.
- Canholi, A. P. (2014). Drenagem urbana e controle de enchentes. 2ª ed. Oficina de Textos, São Paulo, 302p.
- Chang, C. H., Wen, C. G., e Lee, C. S. (2008). “Use of intercepted runoff depth for stormwater runoff management in industrial parks in Taiwan.” *Water Resource Management*, **22**(11), 1609–1623.
- Choodegowda, R. B., Murukannappa e Kedarnath (2015). “Desing of a detention basin to mitigate flood due to temporal change in land use in urban watershed.” *International Journal of Recent Scientific Research*, **6**(3), 3021-3024.
- Chow, M. F., Yusop, Z., e Toriman, M. E. (2012). “Modelling runoff quantity and quality in tropical urban catchments using storm water management model.” *International Journal Environmental Science Technology*, **9**(4), 737–748.
- Chung, E. S., Hong, W. P., Lee, K. S., e Burian, S. J. (2011). “Integrated use of a continuous simulation model and multi-attribute decisionmaking for ranking urban watershed management alternatives.” *Water Resource. Management*, **25**(2), 641–659.
- Costa, M. E. L. (2013). *Monitoramento e modelagem das águas da 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, 179p.
- Dantas, B. O. (2018). Aplicação de geotecnologias (GNSS, LIDAR e VANT) para estudo de drenagem e sedimentos. Estudo de caso da bacia de detenção do Guará – DF. Monografia de projeto final 1 em engenharia ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 40p.
- Dasgupta, S., Gosain, A. K., Rao, S., Roy, S., e Sarraf, M. (2013). “A megacity in a changing climate: The case of Kolkata.” *Clim. Change*, **116**(3-4), 747–766.

- De Paula; A. C. V. (2018). Comportamento e evolução temporal de bacias de detenção e retenção no amortecimento de cheias e na qualidade da água – estudo de caso da bacia de detenção do Guará – DF. Primeiro Seminário de Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 45p.
- De Paula; A. C. V. (2019). Comportamento e evolução temporal de bacias de detenção e retenção no amortecimento de cheias e na qualidade da água – estudo de caso da bacia de detenção do Guará – DF. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, em desenvolvimento.
- Ellis, J.B. (2008). “Third generation urban surface water drainage: from rooftop to the receiving water subcatchment.” In: Proc. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, UK.
- Ellis, J. B., Mitchell, G. (2006) Urban diffuse pollution: key data information approaches for the water framework directive. *Water and Environment Journal*, **20**(0), 19-26.
- Fallah Shorshani, M., Bonhomme, C., Petrucci, G., Andre, M., and Seigneur, C. (2014). “Road traffic impact on urban water quality: A step towards integrated traffic, air and stormwater modelling.” *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, **21**(8), 5297–5310.
- Ferreira, L. C. A. (2008). Variação da qualidade da água do escoamento superficial de duas bacias de drenagem de Natal/RN – Brasil. Dissertação de mestrado em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 119 p.
- Finotti, A., Finkler, R., Silva, M. D., Cemin, G. (2009). Monitoramento de recursos hídricos em áreas urbanas. Caxias do sul: EDUCS, RS, 270 p.
- Fileni, F. (2017). Modelagem quantitativa da drenagem urbana e proposições de drenagem sustentável para a região de Ceilândia- DF. Monografia de Projeto Final em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 79 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, 53p.
- Fu, G., Butler, D., Khu, S. T., e Sun, S. A. (2011). “Imprecise probabilistic evaluation of sewer flooding in urban drainage systems using random set theory.” *Water Resour. Res.*, **47**(2), W02534.
- GDF – Governo do Distrito Federal, Secretaria de Estado de Obras. (2009). Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal. Concremat Engenharia, Brasília.
- Gersonius, B., Ashley, R., Pathirana, A., e Zevenbergen, C. (2013). “Climate change uncertainty: Building flexibility into water and flood risk infrastructure.” *Clim. Change*, **116**(2), 411–423.
- Gomes, C. I. D. (2015). “Avaliação da qualidade de águas pluviais lançadas por bacias de detenção em corpos hídricos do Distrito Federal, DF – Brasil.” In: *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Brasília, DF.
- Gribbin, J. E. (2008). *Introdução à hidráulica, hidrologia e gestão de águas – Tradução da 3ª edição norte-americana*. Cengage, 512p.

- Gülbaz, S., e Kazezyilmaz-Alhan, C. M. (2013). “Calibrated hydrodynamic model for sazlidere watershed in Istanbul and investigation of urbanization effects.” *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000600, 75–84.
- Harrell, L. J. e Ranjithan, S. R. (2003).” Detention Pond Design and Land Use Planning for Watershed Management.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, **129**(2), 98-106.
- Huong, H. T. L., e Pathirana, A. (2013). “Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam.” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **17**(1), 379–394.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. (2019). Gráficos. Disponível em:< <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos>>. Acesso em: 5 de maio de 2019.
- Jia, H., Ma, H., Sun, Z., Yu, S., Ding, Y., e Liang, Y. (2014). “A closed urban scenic river system using stormwater treated with LID-BMP technology in a revitalized historical district in China.” *Ecol. Eng.*, 71, 448–457.
- Kirshen, P., Caputo, L., Vogel, R. M., Mathisen, P., Rosner, A., e Renaud, T. (2014). “Adapting urban infrastructure to climate change: A drainage case study.” *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000443, 04014064.
- Krajewsk, A., Sikorska, A. E. e Banasik, K. (2017). “Modeling Suspended Sediment Concentration in the Stormwater Outflow from a Small Detention Pond.” *Journal of Environmental Engineering*, **143**(10), 05017005.
- Lee, J., Heaney, J., e Pack, C. (2010). “Frequency methodology for evaluating urban and highway storm-water quality control infiltration BMPs.” *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/(ASCE)0733-9496(2010)136:2(237), 237–247.
- Mah, D. Y. S. e Ho, T. Y. (2017). “Alternative Use of Roundabout as Storm water Detention Pond.” *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, **8**(1), 15-23.
- Matias, M. G. B. (2006). Bacias de retenção: estudo de métodos de dimensionamento. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, 237p.
- Morse, N. R., McPhillips, L. E., Spapleigh, J. P. e Walter, M. T. (2017). “The role of desnitrification in Stormwater Detention Basin Treatment of Nitrogen.” *Environmental Science & Technology*, 51, 7928–7935.
- Niazi, M., Nietch, C., Maghrebi, M., Jackson, N., Bennett, B. R., Tryby, M. e Massoudieh, A. (2017). “Storm Water Management Model: Performance Review and Gap Analysis.” *Journal Sustainable Water Built Environmental*, **3**(2): 04017002.
- Oraei Zare, S., Saghafian, B., e Shamsai, A. (2012). “Multi-objective optimization for combined quality-quantity urban runoff control.” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **16**(12), 4531–4542.
- Ouyang, W., Guo, B., Hao, F., Huang, H., Li, J., e Gong, Y. (2012). “Modeling urban storm rainfall runoff from diverse underlying surfaces and application for control design in Beijing.” *J. Environ. Manage.*, 113, 467–473.
- Park, D., Jang, S. e Roesner, L. A. (2012). “Evaluation of multi-use stormwater detention basins for improved urban watershed management.” *Hydrological Processes*, 28, 1104-1113.

- Pinto, Y. J. O. (2017). Avaliação do sistema de drenagem urbana – Sub bacia da Asa Norte, Brasília – DF. Monografia de Projeto Final em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 54p.
- Porto, M.F.A. (1995). Aspectos qualitativos do escoamento superficial em áreas urbanas. In: Tucci, C.E.M.; Porto, R.L.; Barros, M.T.de (organizadores). Drenagem Urbana. ABRH. Porto Alegre, RS.
- Porto, R. M. (2002). Metodologia de cálculo para procedimentos preliminares em bacias de detenção. Tese de Livre-Docência, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Porto, R. M. (2003). “Metodologia de Cálculo para o Planejamento de Bacias de Detenção”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **8**(3), 135-149.
- Righetto, A. M. (2009). Manejo De Águas Pluviais Urbanas. Projeto PROSAB, Editora ABES, Rio de Janeiro, 396p.
- Rossman, L. A. (2015). Storm Water Management Model User’s Manual Version 5.1. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 352p.
- 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, Universidade Federal do Goiás, Goiânia, GO, 140 p.
- Schoroer, W. F., Benitez-Nelson, C. R., Smith, E. M e Ziolkowski, L. A. (2018). “Driver of Sediment Accumulation and Nutrient Burial in Coastal Stormwater Detention Ponds, South Carolina, USA.” *Ecosystems*.
- Sébastien, C., Barraud, S., Gonzalez-Merchan, C., Perrodin, Y. e Visiedo, R. (2014). “Stormwater retention basin efficiency regarding micropollutant loads and ecotoxicity.” *Water Science & Technology*, 974-981.
- Sharma, A. K., Vezzaro, L., Birch, H., Ambjerg-Nielsen, K. e Mikkelsen, P. S. (2016). “Effect of climate change on stormwater runoff characteristics and treatment efficiencies of stormwater retention ponds: a case study from Denmark using TSS and Cu as indicator pollutants.” *Springer Plus*.
- Silva, G. B. L. (2006). Avaliação experimental sobre a eficiência de superfícies permeáveis com vistas ao controle do escoamento superficial em áreas urbanas. Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 199p.
- Silva, A. H. C. L. (2009). Controle da poluição difusa de origem pluvial em uma via de tráfego intenso por meio de trincheira de infiltração e vala de detenção. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, MG, 169p.
- Silva, T. J. B. (2017). Avaliação da rede de drenagem urbana do Setor Habitacional Taquari – DF. Monografia de Projeto Final em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 79p.
- Silveira, A. L. (1997). “Provável efeito urbano nas relações IDF das chuvas de Porto Alegre.” *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **2**(2), 93-107.
- Soares, P.F. (2001). Projeto e avaliação de desempenho de redes de monitoramento de qualidade da água utilizando o conceito de entropia. Tese de doutorado da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 212p.

- Souza, F. P. (2014). Monitoramento e modelagem hidrológica da sub-bacia do lago Paranoá – Brasília/DF – e avaliação de bacia de detenção. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139p.
- Tomaz, P. (2006). “Poluição Difusa”. Navegar Editora, São Paulo, Brasil, 480p.
- Tucci, C. E. M. (1995). “Drenagem Urbana”. Porto Alegre: *Editora da Universidade UFRGS/ABRH*. 428p.
- Tucci, C. E. M. (2002). “Gerenciamento da drenagem urbana.” *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **7**(1), 5-27.
- Tucci, C. E. M. (2003). “Drenagem Urbana.” *Ciência e Cultura*, **55**(4).
- Tucci, C. E. M. (2008). “Águas Urbanas”. In: *Estudos Avançados*, São Paulo, **22**(63), 97-112.
- Tucci, C. E. M. (2016). “Regulamentação da drenagem urbana no Brasil.” *REGA*, **13**(1), 29-42.
- Tsuji, T. M. (2018). Monitoramento e modelagem das águas de drenagem pluvial no núcleo urbano da bacia do Ribeirão Riacho Fundo, Brasília – DF. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 150p.
- Urbonas, B. e Stahre, P. (1993). *Stormwater Best Management Practices and Detention*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, E.U.A, 450p.
- Volken, N. J. (2018). Avaliação hidráulica e hidrológica de bacias de detenção – Estudo de caso da bacia de detenção do Guará II – DF. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 70p.
- Von Sperling, M. (2005). Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, Belo Horizonte, MG, 452p.
- Von Sperling, E.; Tassin, B.; Vinçon-Leite, B. (2006). “Aspectos de qualidade de água em bacias de retenção urbanas”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **11**(2), 27-35.
- Walsh, T. C., Pomeroy, C. A., e Burian, S. J. (2014). “Hydrologic modeling analysis of a passive, residential rain water harvesting program in an urbanized, semi-arid watershed.” *J. Hydrol.*, **508**, 240–253.
- Wang, M., Sun, Y. e Sweetapple, C. (2017). “Optimization of storage tank locations in na urban stormwater drainage system using a two-stage approach.” *Journal of Environmental Management*, **203**, 31-38.
- Wu, J. Y., Thompson, J. R., Kolka, R. K., Franz, K. J., e Stewart, T. W. (2013). “Using the storm water management model to predict urban headwater stream hydrological response to climate and land cover change.” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **17**(12), 4743–4758.
- Young, K. D., Younos, T., Dymond, R. L., Kibler, D. F., e Lee, D. H. (2010). “Application of the analytic hierarchy process for selecting and modeling stormwater best management practices.” *J. Contemp. Water Res. Educ.*, **146**(1), 50–63.