



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

**AVALIAÇÃO DO MODELO SWAT NA ESTIMATIVA
DA VAZÃO DAS SUB-BACIAS MONITORADAS DO
ALTO DESCOBERTO E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS**

FLÁVIO FONSECA FERREIRA

ORIENTADOR: RICARDO TEZINI MINOTI

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

BRASÍLIA, DEZEMBRO DE 2019

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

**AVALIAÇÃO DO MODELO SWAT NA ESTIMATIVA
DA VAZÃO DAS SUB-BACIAS MONITORADAS DO
ALTO DISCOBERTO E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS**

FLÁVIO FONSECA FERREIRA

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

APROVADO POR:

RICARDO TEZINI MINOTI, DOUTOR - (ENC-UnB)
(ORIENTADOR)

SERGIO KOIDE, PhD - (ENC-UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

GILLIARD NUNES - (PTARH – UNB)
(EXAMINADOR INTERNO)

BRASÍLIA/DF, DEZEMBRO de 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

FERREIRA, FLÁVIO FONSECA

Avaliação do modelo SWAT na estimativa da vazão das sub-bacias monitoradas do Alto Descoberto e simulação de cenários

xvii, 108p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2019)

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

1. Modelagem Hidrológica

2. SWAT

3. Calibração Automática

4. Cenários

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERREIRA, F.F. (2019). Avaliação do modelo SWAT na estimativa da vazão das sub-bacias monitoradas do Alto Descoberto e simulação de cenários. Monografia de Projeto Final, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 106 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Flávio Fonseca Ferreira

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação do modelo SWAT na estimativa da vazão das sub-bacias monitoradas do Alto Descoberto e simulação de cenários

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.

Flávio Fonseca Ferreira
flavio.ferreiraflux@gmail.com
(61) 99222-8272

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família, em especial a minha mãe Marly dos Santos e ao meu pai José Ademi que sempre me apoiaram em minhas decisões e escolha profissional, sempre demonstrando amor, compreensão, paciência e apoio incondicional; e aos meus irmãos, Fernanda Fonseca e Filipe Fonseca, por todo suporte, incentivo e amor durante os longos anos de graduação e apoio nos momentos mais difíceis enfrentados durante a trajetória.

Gratidão a todos os professores que se fizeram presente no ensino médio, fundamentais para o processo de aprendizagem, em especial ao professor Antônio Jacó, que instigou e despertou meu interesse de trilhar o caminho universitário. A todos os amigos de curso e momentos compartilhados, sendo fundamentais para meu crescimento pessoal e acadêmico.

Ao meu orientador e professor, Ricardo Minoti, modelo de profissional docente, extremamente dedicado por seu ofício na universidade. Obrigado pelas instruções, disponibilidade, apoio, incentivo, enorme paciência e conhecimento compartilhado durante o período de realização do presente trabalho.

Agradeço ao professor Sergio Koide, pela participação na banca e meus sinceros agradecimentos pelas contribuições e recomendações ao trabalho. Aos professores e colegas do grupo de modelagem hidrológica do PTARH, que possibilitaram grande troca de conhecimento. Agradeço ao Gilliard Nunes, por tamanha ajuda e auxílio durante toda a elaboração deste trabalho, em especial a etapa de calibração e essencial para o estudo. Agradeço também à Sara Ferrigo pela disponibilização da base de dados e a Danielle Bressiane por sanar dúvidas recorrentes via e-mail. Agradeço a Barbara Fim pelas explicações em relação aos dados de qualidade da água e encontros realizados para a coleta de dados, auxiliando no delineamento de novos objetivos para o trabalho focado nos dados quantitativos.

A todos os funcionários da Superintendência de Drenagem Urbana da ADASA e que se fizeram presente no meu estágio na agência, obrigado pela amizade, em especial ao Jeferson da Costa, Carolinne Gomes, Raphael Cintra, Luciano Leoi e Marcos Montenegro.

Agradeço a CAESB, ANA, ADASA, EMBRAPA e INMET pela disponibilidade, confiança e dados fornecidos, fatores os quais permitiram a elaboração deste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental pelo conhecimento e experiências compartilhados durante toda a graduação, determinantes na formação de todos os alunos. Agradeço a todos que de alguma forma fizeram parte desse trabalho e de toda a trajetória da graduação.

“ Quando o mundo estiver unido na busca do conhecimento, e não mais lutando por dinheiro e poder, então nossa sociedade poderá enfim evoluir a um novo nível. ”

Thomas Jefferson

RESUMO

A aplicação de um modelo hidrológico constitui uma ferramenta importante no planejamento e gestão dos recursos hídricos, fornecendo dados e informações importantes acerca dos processos hidrológicos que ocorrem numa determinada bacia hidrográfica. O presente estudo teve como objetivo analisar a performance do modelo SWAT em simular a vazão das sub-bacias monitoradas do Alto Descoberto, sendo elas a sub-bacia do córrego Chapadinha (SBCC), sub-bacia do córrego Capão Comprido (SBCCC), sub-bacia do córrego Olaria (SBCO), sub-bacia do rio Descoberto (SBRD), sub-bacia do ribeirão das Pedras (SBRP) e sub-bacia do ribeirão Rodeador (SBRR). A primeira etapa do trabalho consistiu na estruturação da base de dados, referente aos dados climáticos, uso e ocupação, tipos de solo e topografia do terreno. A segunda etapa compreendeu a modelagem, calibração e geração de cenários de uso e ocupação do solo precedentes e possíveis cenários de uso e ocupação futuro nas sub-bacias. A partir da modelagem inicial e calibração automática do modelo, aplicando-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e o coeficiente de determinação (R^2), foi possível avaliar o desempenho do modelo em representar as vazões médias mensais, obtendo valores satisfatórios de $NSE > 0,5$ e $R^2 > 0,5$ para 4 das sub-bacias em estudo. Com base nos cenários elaborados de uso e ocupação do solo, o balanço hídrico apresentou mudanças significativas, para o cenário preservado verificou-se uma diminuição média de 82% no escoamento superficial e aumento médio de 16% na evapotranspiração, enquanto para o cenário antrópico constatou-se um aumento médio de 277% no escoamento superficial e diminuição média de 19% na evapotranspiração das sub-bacias em estudo.

PALAVRAS CHAVES: Modelagem Hidrológica, SWAT, Calibração Automática, Cenários.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 OBJETIVO GERAL	4
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Ciclo Hidrológico e Balanço Hídrico	5
3.2 Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto	8
3.3 Uso e Ocupação do Solo e Impactos Antrópicos	11
3.4 Sub-Bacia do Alto Descoberto	13
3.4.1 Sub-bacia do Córrego Chapadinha	13
3.4.2 Sub-Bacia do Ribeirão das Pedras	15
3.4.3 Sub-Bacia do Ribeirão Rodeador	17
3.4.4 Sub-Bacia do Rio Descoberto	19
3.4.5 Sub-Bacia do Córrego Olaria	21
3.4.6 Sub-Bacia do Córrego Capão Comprido	22
3.5 Planejamento e Gestão dos recursos Hídricos	24
3.5.1 Recursos Hídricos no Distrito Federal	25
3.5.2 Crise Hídrica no Distrito Federal	26
3.6 Modelos Hidrológicos	29
3.6.1 SWAT	31
3.6.2 SWAT-CUP	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1 Base de Dados	37
4.1.1 Localização Geográfica	37
4.1.2 Modelo Digital de Elevação (MDE)	39
4.1.3 Uso e Ocupação do solo	39

4.1.4 Pedologia	40
4.1.5 Clima	42
4.1.5.1 Estações Pluviométricas	42
4.1.5.1 Estações Fluviométricas	44
4.2 Modelagem das Sub-Bacias	45
4.2.1 Modelagem Preliminar	45
4.2.2 Seleção dos Parâmetros e análise de sensibilidade	46
4.2.3 Calibração e Verificação	50
4.2.4 Cenarização e análise de resultados	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1 Caracterização das Sub-bacias do Alto Descoberto	52
5.1.1 Relevo	52
5.1.1 Uso e Ocupação do Solo	56
5.2 Modelagem Inicial das sub-bacias e HRUs	60
5.3 Seleção dos Parâmetros e Análise de sensibilidade	65
5.4 Calibração do Modelo SWAT para as sub-bacias	68
5.5 Verificação do Modelo SWAT para as sub-bacias	77
5.6 Simulação de Cenários	81
5.6.1 Cenário Preservado	81
5.6.2 Cenário Antrópico	85
5.6.3 Hidrogramas gerados na simulação dos cenários	89
5.6.4 Balanço Hídrico	94
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	96
7. REFERÊNCIAS	98

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 3.1 – Ciclo Hidrológico.</i>	5
<i>Figura 3.2 – Unidades de conservação na Bacia do Alto Rio Descoberto.</i>	9
<i>Figura 3.3 – Sub-bacias da Bacia do Alto Rio Descoberto.</i>	10
<i>Figura 3.4 – Histórico do uso e ocupação da Bacia do Alto Rio Descoberto no DF.</i>	12
<i>Figura 3.5 – Localização da sub-bacia do córrego Chapadinha.</i>	14
<i>Figura 3.6 – Localização da sub-bacia do ribeirão das Pedras.</i>	16
<i>Figura 3.7 – Localização da sub-bacia do ribeirão Rodeador.</i>	18
<i>Figura 3.8 – Localização da sub-bacia do rio Descoberto.</i>	20
<i>Figura 3.9 – Localização da sub-bacia do córrego Olaria.</i>	22
<i>Figura 3.10 – Localização da sub-bacia do córrego Capão Comprido.</i>	23
<i>Figura 3.11 – Integração da gestão da água por setores.</i>	24
<i>Figura 3.12 – Pluviometria Média Bacia do Alto Descoberto 1979-2016.</i>	27
<i>Figura 3.13 – Pluviometria, vazão média anual afluyente e vazão média captada para abastecimento urbano proveniente da Bacia do Alto Descoberto entre 1979-2016.</i>	28
<i>Figura 3.14 – Comparação entre as vazões médias mensais registradas em 2016, com as mínimas vazões médias mensais de toda a série histórica (1978-2015).</i>	28
<i>Figura 4.1 – Esquema metodológico das etapas de trabalho.</i>	36
<i>Figura 4.2 – Localização da bacia hidrográfica do lago Descoberto.</i>	38
<i>Figura 4.3 – Localização das sub-bacias de estudo na bacia hidrográfica do lago Descoberto.</i>	38
<i>Figura 4.4 – Modelo Digital de Elevação das Bacia hidrográfica do Lago Descoberto.</i>	39
<i>Figura 4.5 – Mapa de uso e ocupação do solo da BHL D.</i>	40
<i>Figura 4.6 – Tipos de solos presente na bacia do lago Descoberto.</i>	41

<i>Figura 4.7 – Disposição das estações pluviométricas aplicadas na modelagem das sub-bacias.</i>	43
<i>Figura 4.8 – Disposição das estações fluviométricas aplicadas na modelagem das sub-bacias.</i>	44
<i>Figura 5.1 – Mapa de declividade da sub-bacia do rio Descoberto</i>	52
<i>Figura 5.2 – Mapa de declividade da sub-bacia do córrego Chapadinha.</i>	53
<i>Figura 5.3 – Mapa de declividade da sub-bacia do córrego Olaria.</i>	53
<i>Figura 5.4 – Mapa de declividade da sub-bacia do ribeirão Rodeador.</i>	54
<i>Figura 5.5 – Mapa de declividade da sub-bacia do córrego Capão Comprido.</i>	54
<i>Figura 5.6 – Mapa de declividade da sub-bacia do ribeirão das Pedras.</i>	55
<i>Figura 5.7 – Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do rio Descoberto.</i>	56
<i>Figura 5.8 – Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do córrego Chapadinha.</i>	57
<i>Figura 5.9 – Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do córrego Olaria.</i>	57
<i>Figura 5.10 – Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do ribeirão Rodeador.</i>	58
<i>Figura 5.11 – Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do córrego Capão Comprido</i>	58
<i>Figura 5.12 – Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do ribeirão das Pedras.</i>	59
<i>Figura 5.13 – Hidrogramas observado e simulado (sem calibração) da sub-bacia do córrego Chapadinha para os anos hidrológicos correspondentes ao período de 2000 a 2010.</i>	61
<i>Figura 5.14 – Hidrogramas observado e simulado (sem calibração) da sub-bacia do córrego Capão Comprido para os anos hidrológicos correspondentes ao período de 2000 a 2010.</i>	61
<i>Figura 5.15 – Hidrogramas observado e simulado (sem calibração) da sub-bacia do córrego Olaria para os anos hidrológicos correspondentes ao período de 2000 a 2010.</i>	62
<i>Figura 5.16 – Hidrogramas observado e simulado (sem calibração) da sub-bacia do rio Descoberto para os anos hidrológicos correspondentes ao período de 2000 a 2010.</i>	62
<i>Figura 5.17 – Hidrogramas observado e simulado (sem calibração) da sub-bacia do ribeirão das Pedras para os anos hidrológicos correspondentes ao período de 2000 a 2010.</i>	63

<i>Figura 5.18 – Hidrogramas observado e simulado (sem calibração) da sub-bacia do ribeirão Rodeador para os anos hidrológicos correspondentes ao período de 2000 a 2010.</i>	63
<i>Figura 5.19 – Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do córrego Chapadinha após a calibração dos parâmetros.</i>	69
<i>Figura 5.20 – Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do córrego Capão Comprido após a calibração dos parâmetros.</i>	69
<i>Figura 5.21 – Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do córrego Olaria após a calibração dos parâmetros.</i>	70
<i>Figura 5.22 – Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do rio Descoberto após a calibração dos parâmetros.</i>	70
<i>Figura 5.23 - Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do ribeirão das Pedras após a calibração dos parâmetros.</i>	71
<i>Figura 5.24 – Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do ribeirão Rodeador após a calibração dos parâmetros.</i>	71
<i>Figura 5.25 – Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do córrego Chapadinha após a segunda calibração dos parâmetros.</i>	75
<i>Figura 5.26 – Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do córrego Capão Comprido após segunda calibração dos parâmetros.</i>	75
<i>Figura 5.27 – Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do córrego Olaria após segunda calibração dos parâmetros.</i>	76
<i>Figura 5.28 – Hidrogramas observado e simulado na verificação da sub-bacia do córrego Chapadinha.</i>	77
<i>Figura 5.29 – Hidrogramas observado e simulado na verificação da sub-bacia do córrego Capão Comprido.</i>	78
<i>Figura 5.30 – Hidrogramas observado e simulado na verificação da sub-bacia do córrego Olaria.</i>	78
<i>Figura 5.31 – Hidrogramas observado e simulado na verificação da sub-bacia do rio Descoberto.</i>	79

<i>Figura 5.32 – Hidrogramas observado e simulado na verificação da sub-bacia do ribeirão das Pedras.</i>	79
<i>Figura 5.33 – Hidrogramas observado e simulado na verificação da sub-bacia do ribeirão Rodeador.</i>	80
<i>Figura 5.34 – Cenário preservado de uso e ocupação do solo da sub-bacia do córrego Chapadinha.</i>	82
<i>Figura 5.35 – Cenário preservado de uso e ocupação do solo da sub-bacia do córrego Capão Comprido.</i>	82
<i>Figura 5.36 – Cenário preservado de uso e ocupação do solo da sub-bacia do córrego Olaria.</i>	83
<i>Figura 5.37 – Cenário preservado de uso e ocupação do solo da sub-bacia do rio Descoberto.</i>	83
<i>Figura 5.38 – Cenário preservado de uso e ocupação do solo da sub-bacia do ribeirão das Pedras.</i>	84
<i>Figura 5.39 – Cenário preservado de uso e ocupação do solo da sub-bacia do ribeirão Rodeador.</i>	84
<i>Figura 5.40 – Cenário antrópico de uso e ocupação do solo da sub-bacia do córrego Chapadinha.</i>	86
<i>Figura 5.41 – Cenário antrópico de uso e ocupação do solo da sub-bacia da sub-bacia do córrego Capão Comprido.</i>	86
<i>Figura 5.42 – Cenário antrópico de uso e ocupação do solo da sub-bacia da sub-bacia do córrego Olaria.</i>	87
<i>Figura 5.43 – Cenário antrópico de uso e ocupação do solo da sub-bacia da sub-bacia do rio Descoberto.</i>	87
<i>Figura 5.44 – Cenário antrópico de uso e ocupação do solo da sub-bacia da sub-bacia do ribeirão das Pedras.</i>	88
<i>Figura 5.45 – Cenário antrópico de uso e ocupação do solo da sub-bacia da sub-bacia do ribeirão Rodeador.</i>	88

- Figura 5.46 – Hidrogramas observado, simulado, cenário antrópico e preservado da sub-bacia do córrego Chapadinha (SBCC).* 90
- Figura 5.47 – Hidrogramas observado, simulado, cenário antrópico e preservado da sub-bacia do córrego Capão Comprido (SBCCC).* 90
- Figura 5.48 – Hidrogramas observado, simulado, cenário antrópico e preservado da sub-bacia do córrego Olaria (SBCO).* 91
- Figura 5.49 – Hidrogramas observado, simulado, cenário antrópico e preservado da sub-bacia do rio Descoberto (SBRD).* 91
- Figura 5.50 – Hidrogramas observado, simulado, cenário antrópico e preservado da sub-bacia do ribeirão das Pedras (SBRP).* 92
- Figura 5.51 – Hidrogramas observado, simulado, cenário antrópico e preservado da sub-bacia do ribeirão Rodeador (SBRR).* 92

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 4.1 – Tipos de solos presente nas sub-bacias do lago Descoberto.</i>	41
<i>Tabela 4.2 – Informações básicas sobre as estações pluviométricas.</i>	42
<i>Tabela 4.3 – Estações pluviométricas aplicadas no SWAT para cada sub-bacia em estudo.</i>	43
<i>Tabela 4.4 – Síntese dos dados, fonte e período.</i>	45
<i>Tabela 4.5 – Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da vazão.</i>	47
<i>Tabela 5.1 – Classes de declividade e respectivas áreas e porcentagens em cada sub-bacia de estudo.</i>	55
<i>Tabela 5.2 – Número de sub-bacias de drenagem e de Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) nas sub-bacias estudadas.</i>	60
<i>Tabela 5.3 – Vazão média observada e simulada na modelagem inicial.</i>	64
<i>Tabela 5.4 – Avaliação estatística da modelagem inicial das sub-bacias.</i>	64
<i>Tabela 5.5 – Características dos parâmetros utilizados na análise de sensibilidade nas sub-bacia em estudo (adaptado de Ferrigo, 2014).</i>	65
<i>Tabela 5.6 – Parâmetros mais sensíveis na vazão das sub-bacias em estudo.</i>	67
<i>Tabela 5.7 – Vazão média observada e simulada na modelagem da primeira calibração.</i>	72
<i>Tabela 5.8 – Avaliação estatística da modelagem da primeira calibração das sub-bacias.</i>	72
<i>Tabela 5.9 – Parâmetros adicionados para calibração das sub-bacias (SBCC, SBCCC, SBCO).</i>	73
<i>Tabela 5.10 – Parâmetros mais sensíveis na vazão da SBCC, SBCCC e SBCO.</i>	74
<i>Tabela 5.11 – Avaliação estatística da modelagem da segunda calibração da SBCC, SBCCC E SBCO.</i>	76
<i>Tabela 5.12 – Vazão média observada e simulada na modelagem da segunda calibração.</i>	77
<i>Tabela 5.13 – Avaliação estatística na verificação do modelo.</i>	81

<i>Tabela 5.14 – Vazão média observada e simulada na verificação do modelo.</i>	81
<i>Tabela 5.15 – Percentuais do usos e ocupação do solo das sub-bacias para o cenário preservado.</i>	85
<i>Tabela 5.16 – Percentuais do usos e ocupação do solo das sub-bacias para o cenário antrópico.</i>	89
<i>Tabela 5.17 – Avaliação estatística da modelagem das sub-bacias para o período de 2000 a 2005.</i>	93
<i>Tabela 5.18 – Vazão média observada, simulada e para os cenários antrópico e preservado.</i>	93
<i>Tabela 5.19 – Valores relacionados ao ciclo hidrológico simulado nas sub-bacias.</i>	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADASA – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal

ANA – Agência Nacional de Águas

ARS – Agricultural Service Research

BHAD – Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto

BHLD – Bacia Hidrográfica do Lago Descoberto

BHs – Bacias Hidrográficas

CAESB – Companhia de Saneamento do Distrito Federal

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CRHDF – Conselho de Recursos Hídricos do Distrito Federal

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

EMATER – Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ETA – Estação de Tratamento de Água

GDF – Governo do Distrito Federal

HRU – Hydrologic Response Unit

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

LV – Latossolo Vermelho

LVA – Latossolo Vermelho-Amarelo

MMA – Ministério do Meio Ambiente

PGIRH – Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

PTARH – Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

SANEAGO – Companhia de Saneamento de Goiás

SBCC – Sub-Bacia do Córrego Chapadinha

SBCC – Sub-Bacia do Córrego Capão Comprido

SBCO – Sub-Bacia do Córrego Olaria

SBRD – Sub-Bacia do Rio Descoberto

SBRP – Sub-Bacia do Ribeirão das Pedras

SBRR – Sub- Bacia do Ribeirão Rodeador.

SWAT – Soil and Water Assessment Tool

UNESCO – United Nations Education Scientific and Cultural Organization

USDA – United States Department of Agriculture

1. INTRODUÇÃO

A bacia do Rio Descoberto está situada na porção oeste do Distrito Federal. Na década de 1970, foi realizada uma obra de represamento do rio Descoberto, com a finalidade de formar um reservatório para que no período de estiagem fosse utilizado para abastecer a crescente população de Brasília. Atualmente, o principal reservatório de abastecimento do Distrito Federal é do Descoberto, projetado para regularizar uma vazão na ordem de 6,9 m³/s. A situação de uso de água do reservatório está dividida em abastecimento urbano, 78,5% do total, que representa o maior volume, seguido da irrigação correspondendo a 19% e abastecimento rural com 2,1% (ADASA, 2012).

As bacias hidrográficas são caracterizadas por uma diversidade de processos dinâmicos e complexos, que podem ser alterados por fatores externos como as atividades antrópicas. Nesse sentido, uma das vertentes do planejamento e gestão ambiental tem sido o manejo integrado de bacias hidrográficas, que visa compatibilizar o uso das águas, tais como abastecimento público, irrigação, geração de energia, pesca, navegação e recreação com a preservação ambiental, de forma a minimizar os impactos negativos. Quando a gestão integrada dos recursos hídricos não é realizada de maneira eficiente, tem como consequência a geração de problemas sociais, econômicos e ambientais, causando o assoreamento de corpos d'água e prejudicando os diversos setores que necessitam da água para suas atividades.

Os modelos hidrológicos, uma vez alimentados com dados básicos da bacia hidrográfica ou região de interesse, podem fornecer uma série de informações e dados sobre as variáveis hidrológicas do local, tais como a vazão dos corpos hídricos, a evapotranspiração e infiltração. A modelagem hidrológica pode auxiliar na compreensão desses processos, contribuindo para o planejamento e para a otimização do gerenciamento dos recursos hídricos (FERRIGO, 2014). A modelagem permite que se possa prever o impacto causado pelo crescimento urbano ou pela expansão das atividades agrícolas, por exemplo, estimando os impactos dos diferentes usos do solo e as consequências aos recursos hídricos. Modelos são capazes de estimar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, gerando

resultados que podem dar subsídio para o entendimento dos processos e para a tomada de decisões, essenciais na gestão dos recursos hídricos (DISTRITO FEDERAL, 2018).

O modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT), desenvolvido pelo Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture (ARS/USDA) destaca-se nas aplicações de simulação dos efeitos da agricultura nos processos hidrológicos. O objetivo no desenvolvimento do modelo foi para prever e avaliar os efeitos do manejo e de mudanças no uso do solo sobre os recursos hídricos, principalmente em bacias hidrográficas rurais não monitoradas (ARNOLD et al., 1998). O *software* é de domínio público e possibilita a análise dos impactos oriundos de diferentes cenários de uso e ocupação do solo, práticas de manejo e condições climáticas no balanço hídrico, nos sedimentos e na qualidade da água (NEITSCH et al., 2009).

Dessa forma, a utilização da modelagem hidrológica com enfoque na análise e tratamento da informação tem sido cada vez mais recorrente. Isso se deve a grande quantidade de resultados gerados relacionados aos aspectos quantitativos e qualitativos das variáveis hidrológicas, assim como no estudo de possíveis cenários, com o objetivo de prever possíveis mudanças no comportamento hidrológico e no regime de vazão das sub-bacias. A partir da aplicação do modelo SWAT – Soil and Water Assessment Tool, desenvolvido pelo departamento de agricultura dos Estados Unidos foi possível realizar a previsão de cenários de acordo com os usos e manejo do solo das sub-bacias que constituem a bacia do lago descoberto.

Com base na relevância que o reservatório do Descoberto possui no abastecimento público do Distrito Federal, a execução de estudos que possibilitem o diagnóstico ambiental da Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto tem um papel importante no planejamento do uso dos recursos hídricos provenientes de seu reservatório, gerando dados e informações dessa importante unidade hidrográfica do Distrito Federal.

Para tanto o trabalho visa a realização um diagnóstico atualizado do uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto, modelagem de vazão e determinação do balanço hídrico das sub-bacias afluentes. O desenvolvimento do trabalho ocorreu a partir da aplicação do modelo hidrológico SWAT com a interface QGIS, avaliando a simulação da vazão das sub-bacias, execução do processo de calibração dos parâmetros hidrológicos a fim de

atingir resultados mais próximos da realidade e a geração de cenários com diferentes usos e ocupação do solo.

Este documento está estruturado em sete capítulos. O Capítulo 1 consiste na Introdução, o Capítulo 2 apresenta os objetivos gerais e específicos do presente projeto de pesquisa. O Capítulo 3 é referente à fundamentação teórica e revisão bibliográfica. O Capítulo 4 apresenta a metodologia aplicada no estudo das sub-bacias afluentes ao reservatório do Descoberto. O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos utilizando o modelo. O Capítulo 6 consiste nas conclusões alcançadas e o Capítulo 7 o referencial bibliográfico utilizado no estudo.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar os componentes do ciclo hidrológico por meio das simulações geradas pelo modelo SWAT para as sub-bacias monitoradas que constituem a bacia hidrográfica do reservatório Descoberto, com base em diferentes cenários de uso e ocupação do solo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir a base de dados de uso e ocupação do solo, pedologia, topografia e hidrografia das sub-bacias afluentes ao reservatório Descoberto.
- Aplicar o modelo SWAT nas sub-bacias afluentes ao reservatório Descoberto, avaliando as simulações das vazões médias mensais obtidas pelo modelo em comparação as vazões médias mensais observadas.
- Simular cenários de uso e ocupação do solo para a condição preservada e antropizado das sub-bacias afluentes ao reservatório Descoberto, analisando os efeitos nas variáveis hidrológicas.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ciclo Hidrológico e Balanço Hídrico

A água se encontra presente em vários ambientes, tais como na atmosfera, na superfície dos continentes, mares, oceanos e no subsolo, no qual podem ocorrer em três estados físicos: sólido, líquido e gasoso. A movimentação, transporte ou transferência da água entre os diversos meios e locais do planeta envolve um conjunto de processos, criando um estabelecendo uma ordem de vários fluxos, que é denominado ciclo hidrológico (ARROIO, 2016).

O ciclo hidrológico é um termo conveniente para denotar a circulação de água no meio terrestre e atmosférico, e representa um processo dinâmico, que trata sobre os diferentes caminhos que a água pode percorrer e se transformar ao longo do tempo. O ciclo hidrológico é parte integrante da biosfera e seus diversos sistemas. Na atmosfera a água se encontra principalmente no estado gasoso; na hidrosfera, está presente na fase líquida ou sólida na superfície do planeta Terra; e na litosfera abrange as águas subterrâneas, tais como nos três diferentes estados físicos (CHOW, 1964).

A transferência de água pode acontecer em qualquer um dos três estados físicos, no qual os processos hidrológicos ocorrem em duas direções específicas, no sentido superfície-atmosfera onde o fluxo de água ocorre na forma de vapor como resultado dos fenômenos de evaporação e transpiração, e o outro no sentido atmosfera-superfície, representadas pelas precipitações (SILVEIRA, 2009). Uma representação esquemática do ciclo hidrológico é apresentada na Figura 3.1.

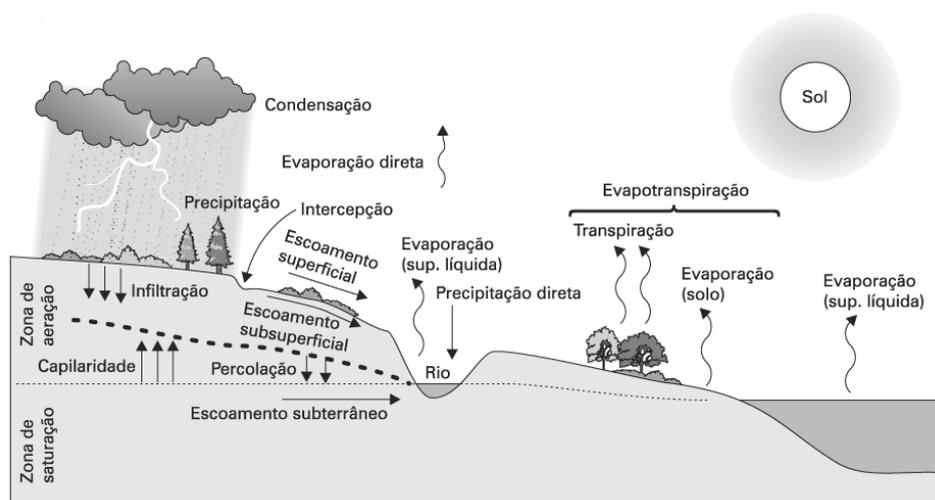


Figura 3.1 - Ciclo Hidrológico. (BRAGA. et al., 2005).

A partir da Figura 3.1, observa-se que o ciclo hidrológico é constituído pelas seguintes fases: (UZEIKA, 2009).

- **Precipitação:** corresponde à água que cai da atmosfera sobre a superfície terrestre;
- **Escoamento:** caracteriza-se pelo movimento da água sob a superfície terrestre, e subdivide-se em superficial ou subsuperficial;
- **Infiltração:** abrange a porção de água que penetra no solo;
- **Percolação:** consiste no movimento da água internamente no perfil do solo;
- **Evaporação:** transformação da água em estado líquido para a fase gasosa;
- **Transpiração:** processo de perda de vapor d'água pelas plantas e demais seres-vivos.

A magnitude do escoamento superficial é função de vários fatores, tais como a intensidade da chuva, distribuição espacial da precipitação, permeabilidade do solo, presença e tipo de vegetação, área da bacia de drenagem, duração da chuva, declividade da superfície do terreno, profundidade do nível das águas subterrâneas e geometria dos corpos hídricos, estes podem ser considerados os principais (MANOEL-FILHO, 2000).

Em nível global o ciclo hidrológico pode ser considerado um sistema fechado, mas quando se analisa unidades e elementos menores que a constituem, como as bacias hidrográficas (BHs), percebe-se a existência da transferência de energia e massa com o exterior (SILVEIRA, 2014). Outras variáveis possuem papel fundamental na manutenção da dinâmica do ciclo, por isso conhecer e compreender o papel ecológico destas é importante para a tomada de ações no manejo de bacias hidrográficas. As bacias hidrográficas representam uma determinada área que possui características bem definidas e de uso bastante consagrado na hidrologia, são sistemas naturais abertos que estão em constante troca de energia e matéria com o meio externo (LIMA, 1996).

Segundo Righetto (1998), os sistemas hidrológicos podem ser analisados a partir da quantificação das entradas (vazões ou volumes afluentes) e saídas de água (vazões ou volumes efluentes), através de processos físicos determinísticos ou probabilísticos expressos matematicamente por uma ou mais funções de transferência. Por conseguinte, a partir da aplicação do princípio da conservação de massa em um sistema hídrico particular, é possível

quantificar/mensurar os diversos processos envolvidos no ciclo hidrológico sob a forma de uma relação matemática denominada equação do balanço hídrico.

Nas aplicações da equação do balanço hídrico em que o volume de controle é a bacia hidrográfica, considera-se que a quantidade de entrada corresponde ao volume da água precipitada e a quantidade de saída é dada pela soma do volume de água escoado pela seção exutória acrescida dos volumes correspondentes às perdas intermediárias, tais como a evaporação e transpiração. As quantidades infiltradas profundamente podem ser tratadas como volume de saída ou incorporadas no termo de armazenamento, que dependem do contexto de aplicação e de características específicas (ARROIO, 2016).

Em geral, a equação básica do balanço hídrico em uma bacia hidrográfica pode ser escrita da seguinte maneira (KARMANN, 2000):

$$P - ETR - Q \pm \Delta S = 0$$

Onde: P = precipitação; ETR = evapotranspiração real; Q = deflúvio e ΔS = variação do armazenamento de água no solo, no qual as unidades comumente utilizadas estão em (mm/ano) ou (L/s.Km²).

A aplicação do balanço hídrico é possível para qualquer tipo de região ou localidade, mas é necessário à quantificação dos termos individuais da equação, o que torna o processo difícil na realidade (EMÍDIO, 2008). A determinação desses termos envolve o levantamento de dados observados ou de expressões que representem os processos físicos adequadamente, os quais nem sempre se encontram disponíveis, além do fato de algumas variáveis serem de quantificação bastante complexa e dependerem de métodos analíticos pouco precisos, tais como no caso da infiltração e percolação.

A principal dificuldade se encontra em quantificar de maneira adequada a variação do armazenamento de água no solo (ΔS). Karmann (2000) destaca que o armazenamento de água se concentra nas formações geológicas do subsolo, cujo fluxo é muito mais lento que o escoamento superficial direto. O valor positivo é utilizado para indicar que o escoamento total da bacia é alimentado pelo fluxo de água subterrânea (período de estiagem) e o valor negativo indica períodos de recarga (época de chuvas).

Pode-se obter a quantidade de entrada (precipitação) através da adequada instalação de pluviômetros espacialmente distribuídos. A Organização Meteorológica Mundial (OMM) sugere que o período de observação ideal para dados climáticos seja de 30 anos sem interrupção, pois torna possível observar com clareza os padrões pluviométricos de uma determinada região sem que haja muita discrepância caso seja realizado análises e previsões.

Avaliar o ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica permite compreender sua dinâmica, suas relações e comportamento, possibilitando identificar períodos de vazão baixa e alta, contribuindo para a previsão de cenários futuros como ocorrência de enchentes e estiagens, assim como períodos e volumes de recarga da água subterrânea, o uso do hidrograma se torna uma ferramenta essencial nos estudos hidrológicos (KARMANN, 2000).

3.2 Bacia Hidrográfica do Alto Descoberto

A Bacia do Rio Descoberto está localizada na porção oeste do Distrito Federal e juntamente com a Bacia do Lago Paranoá é uma das mais povoadas. A bacia do rio Descoberto limita o território do Distrito Federal com os municípios goianos de Padre Bernardo, Cocalzinho, Águas Lindas de Goiás e Santo Antônio do Descoberto (margeando em território goiano até desaguar no rio Corumbá).

A área estudada está situada na porção superior da bacia do rio Descoberto, que vai desde seu montante até a barragem do lago Descoberto, denominada comumente de Alto Descoberto, no qual compreende uma área de 452 Km² que é equivalente a 54,8% do total da bacia (REATTO et al, 2003).

O Rio Descoberto constitui no principal curso d'água dessa bacia, drenando o DF no extremo oeste do território e dividindo o mesmo do Estado de Goiás (GDF, 2014). Com o objetivo de preservar a qualidade de água desse manancial, foram instituídas quatro unidades de conservação na região da Bacia do Alto Rio do Descoberto (Figura 3.2), que desempenham uma função na distribuição espacial do uso e ocupação do solo e, portanto, no ordenamento territorial. Algumas diretrizes são propostas, como a proibição do uso de agrotóxicos e defensivos agrícolas não registrados, a prática de atividades de suinocultura e de avicultura, além de novas ocupações urbanas ou loteamento com características urbanas. À vista disso,

criou-se diversas áreas de proteção ambiental, tendo-se como propósito prevenir a expansão e a ocupação do solo, assim como de preservar os cursos d'água e o reservatório do lago do descoberto. (NUNES, 2014).

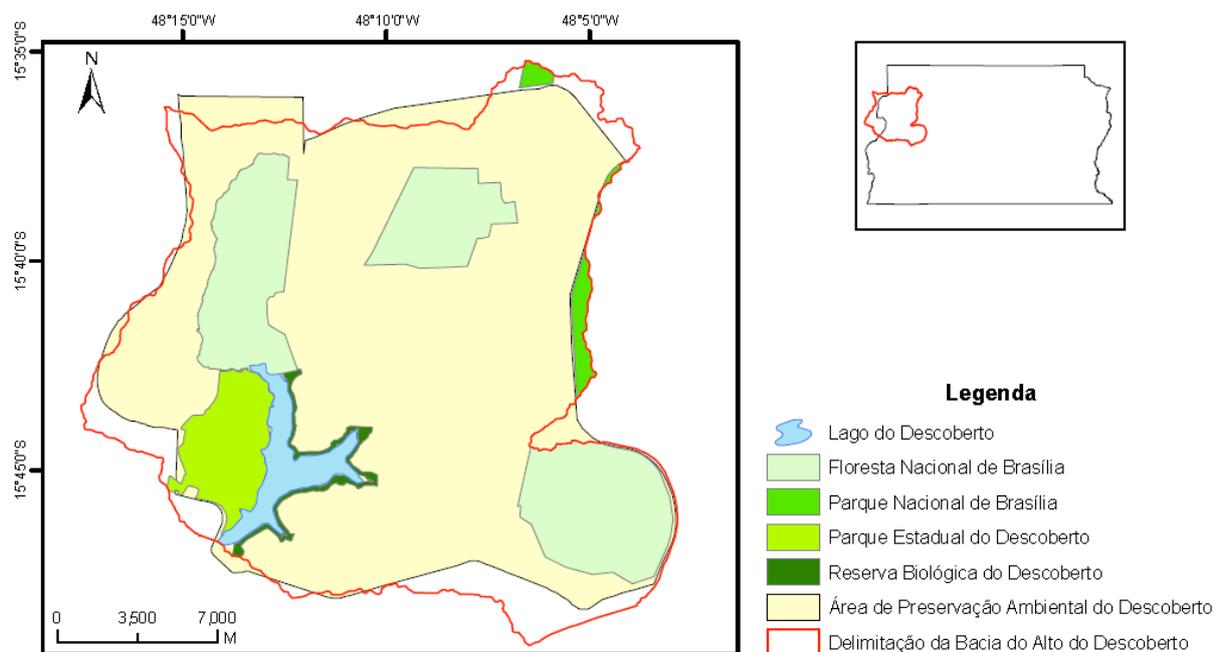


Figura 3.2 - Unidades de conservação na Bacia do Alto Rio Descoberto (NUNES, 2014).

Apesar das determinações de restrições ambientais ligadas ao uso e ocupação do solo, observou-se presença de suinocultura em escala comercial na Bacia do Alto Rio Descoberto, criação de gado, hortifrutigranjeiros e agricultura intensiva, uso inadequado de agrotóxicos e fertilizantes, sendo necessário não somente a adequada fiscalização dessas áreas, como também a criação de projetos sociais ligados a educação ambiental que estimulem a população local nessa preservação ambiental (LIMA, 2004; MACEDO, 2004).

Simultaneamente ao processo de uso e ocupação do solo por meio da expansão agrícola e urbana são observadas consequências provenientes dessas expansões sem o devido planejamento e fiscalização. Destaca-se como principais problemas a perda das matas de galeria ao longo dos rios tributários do reservatório, atividades agrícolas sendo desenvolvidas às margens do Lago do Descoberto podendo causar poluição e perda da qualidade de água e áreas de solo exposto, com presença de resíduos e lixo a céu aberto, gerando poluição e possível perda de solos (NUNES, 2014).

Além da predisposição agrícola evidenciada ao longo dos anos, a Bacia do Alto Rio Descoberto também apresenta uma mudança no uso e ocupação do solo devido ao adensamento urbano no núcleo rural de Alexandre Gusmão (DF) e pelo crescimento urbano de Brazlândia (DF) e Águas Lindas (GO) (NUNES, 2011).

O lago Descoberto localiza-se na latitude 15°52' S e na longitude 48° 10' W no limite ocidental do Distrito Federal com o Goiás, onde seu ponto de barramento pode ser acessado através da rodovia BR-070. Este Lago possui comprimento máximo de 25,5 Km, largura máxima de 8 Km e profundidade máxima de 32 metros (REATTO et al, 2003). O Lago do Descoberto possui uma área de 17 Km² e um volume de aproximadamente 120 milhões de m³ (CAESB, 2006).

A Bacia do Alto Rio Descoberto possui como principais tributários do lago do Descoberto a sub-bacias a seguir: Capão Comprido, Chapadinha, Rio Descoberto, Olaria, Ribeirão das Pedras, Rodeador, Coqueiro e Rocinha (Figura 3.3).

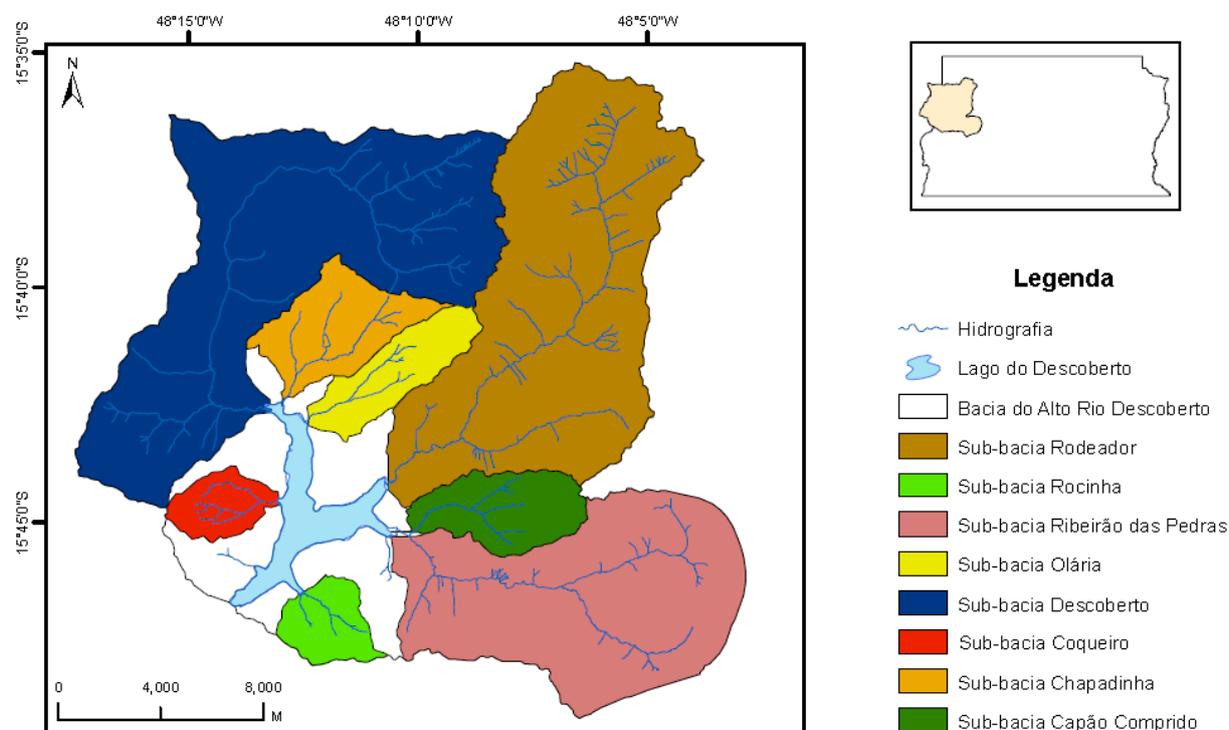


Figura 3.3 - Sub-bacias da Bacia do Alto Rio Descoberto (NUNES, 2014).

A Bacia do Alto Rio Descoberto teve sua ocupação consolidada após a construção da barragem do Lago do Descoberto em 1973, no qual atraiu diversas pessoas residindo próximas as suas margens e habitando terrenos presentes nas sub-bacias afluentes ao reservatório, principalmente nas sub-bacias do Chapadinha, Olaria e Rodeador. Tal construção viabilizou a formação do Lago do Descoberto, que possui grande importância na captação de água para consumo humano da cidade de Brasília e para suprir as demandas do processo de expansão urbana e crescimento populacional (NUNES, 2011).

3.3 Uso e Ocupação do Solo e Impactos Antrópicos

As modificações no uso e ocupação do solo no Distrito Federal revelam que a partir da década de 1960 houve um crescente aumento das taxas de urbanização e de expansão agrícola na região. A partir da década de 1970 houve a consolidação das práticas agrícolas que deixaram de ocupar as margens dos cursos d' água e passaram a ocupar áreas de campo e cerrado. Entre os anos 1954 e 2001 houve uma perda de 47% da cobertura original de matas assim como de 74% de perda da cobertura original do Cerrado. A partir de 1998 houve uma desaceleração da perda da cobertura natural principalmente devido ao fato de terem restado poucas áreas remanescentes de vegetação natural a serem ocupadas. No entanto, o crescimento populacional desencadeou um maior adensamento do parcelamento do solo e do processo de conversão de áreas utilizadas para produção agrícola em áreas de uso urbano (UNESCO, 2002).

Nunes (2014) apresenta mapas com as alterações ocorridas na Bacia do Alto Rio Descoberto entre 1953 a 1998. Apesar da análise não contemplar todo o território da bacia, pois não foi analisado a porção do estado de Goiás, é possível observar o panorama de uso e ocupação do solo e as tendências ao longo dos anos (Figura 3.4).

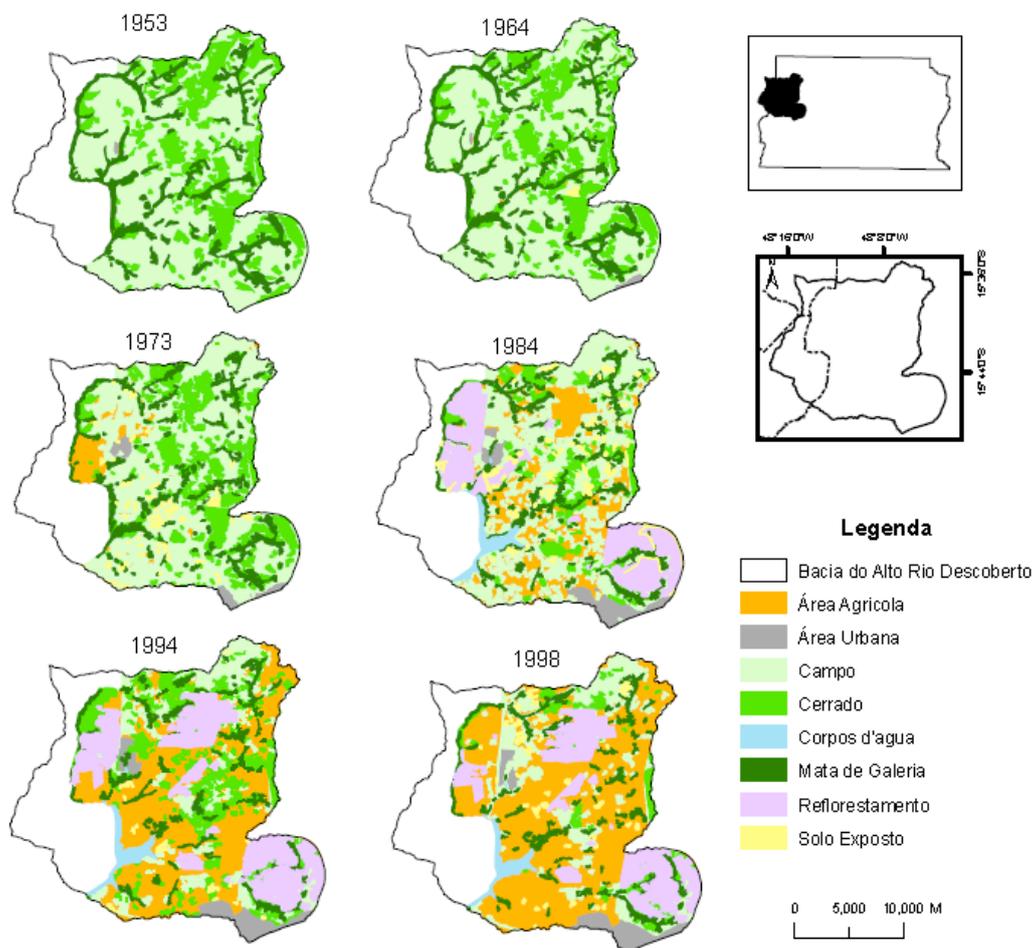


Figura 3.4 - Histórico do uso e ocupação da Bacia do Alto Rio Descoberto no DF (NUNES, 2014).

A partir dos meados da década de 1960 houve uma expansão da área urbana de Brazlândia, além do início do desenvolvimento agrícola. Entre a década de 1970 e meados da década de 1980, houve uma expansão da atividade agrícola e urbana na região. Na década de 1990, o processo de expansão dessas atividades na região teve continuidade, além da consolidação dos usos. Ocorreu, portanto, a perda de vegetação nativa em detrimento do aumento das atividades voltadas para a agricultura, a silvicultura e a consolidação de áreas urbanas (UNESCO, 2002).

Nas áreas agrícolas o solo descoberto torna-se vulnerável à erosão, propiciando o empobrecimento do solo (arraste de nutrientes) e aumento na produção de sedimentos. A qualidade dos recursos hídricos também é afetada pois ocorre o aporte de grandes quantidades de solo, matéria orgânica e insumos agrícolas para o leito dos rios nos eventos chuvosos. A

complexidade dos processos relacionados a qualidade da água tem motivado o desenvolvimento de pesquisas e estudos com a aplicação de modelos, objetivando estabelecer um entendimento e percepção mais precisa da dinâmica hídrica em bacias hidrográficas (NUNES, 2016).

Dessa forma, os estudos realizados mostram as tendências da expansão da ocupação antrópica na Bacia do Alto Rio Descoberto, que em alguns aspectos vão de encontro às políticas instituídas no âmbito das unidades de conservação, além de evidenciar alguns impactos referente ao uso e ocupação do solo. Considerando a dimensão e as consequências dos impactos dessas atividades, é necessário um planejamento territorial adequado, a fim de delimitar áreas para cada uso baseado nos possíveis impactos gerados e de promover práticas mitigadoras a serem adotadas em áreas que possui uma consolidação do uso do solo para práticas agrícolas (NUNES, 2014).

3.4 Sub-Bacias do Alto Descoberto

3.4.1 Sub-bacia do Córrego Chapadinha

O território da Sub-bacia do Córrego Chapadinha localiza-se na Região Administrativa de Brazlândia - RA IV, localizando-se a noroeste no DF e compõe a bacia do alto curso do rio Descoberto. A sub-bacia do córrego Chapadinha apresenta uma área de 20,37 km², equivalente a 4,50% da área da BHL D, com altitude que varia de 1.030 a 1.280 metros. A cidade de Brazlândia confere um significativo grau de urbanização à sub-bacia, e situa-se a 45 Km de distância de Brasília (CODEPLAN, 2012).

Na área rural, a economia é voltada para a produção de hortifrúti em pequenas propriedades de 2 a 5 hectares. Atualmente, 38% das hortaliças comercializadas no DF, possuem origem em Brazlândia. A produção vem de 2,8 mil propriedades rurais, e o principal cultivo é o morango, além de alface, cenoura, vargem, jiló, couve, pimentão, beterraba, abóbora, tomate, goiaba, banana, entre outros (EMATER, 2017).

A peculiaridade ambiental fica por conta dos recursos hídricos, pois o córrego Chapadinha possui uma vazão média observada de 0,44 m³/s, no qual deságua no lago

Descoberto, manancial destinado ao fornecimento de água para consumo humano em diversas regiões do DF (ADASA, 2017). O córrego Chapadinha possui uma extensão 2.442 metros e é formado a partir da confluência do córrego Pulador com comprimento de 4.295 metros e o córrego Veredinha com extensão de 2.752 metros, além disso possui como afluente e a jusante de seu curso o córrego Capãozinho, com extensão de 2.602 metros, os córregos que constituem a sub-bacia do Chapadinha são definidos como de classe 2 e não perenes (SEDUH, 2019).

Os maiores picos de vazão na sub-bacia não ultrapassam 4 m³/s e o menor valor de vazão registrado é de 0,013 m³/s (MMA, 2014). Destaca-se que, o córrego Veredinha foi represado, e deu origem ao lago Veredinha em 1978. O lago tem uma área de aproximadamente 86.400 m², no qual é destinado exclusivamente, ao lazer e ao turismo. Por consequência, o território da sub-bacia exerce importante papel no desenvolvimento social, econômico e ambiental na região do DF (COSTA, 2015). A Figura 3.5 evidencia a localização da sub-bacia.

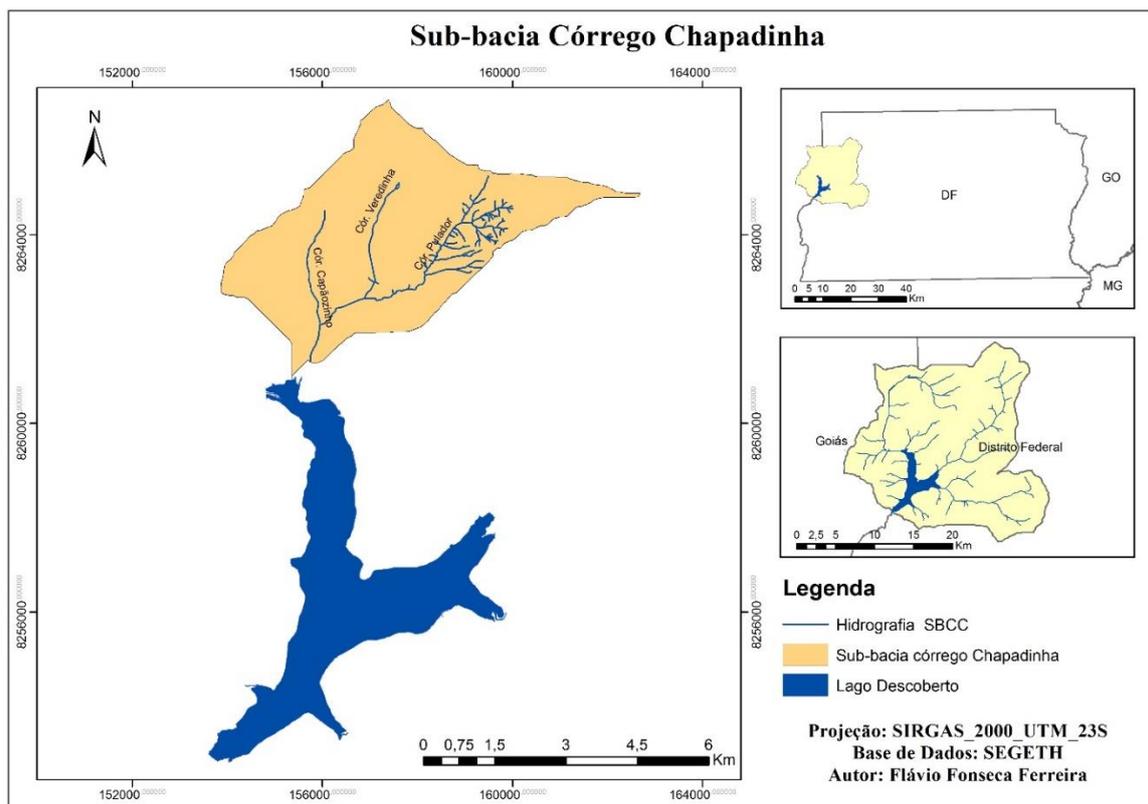


Figura 3.5 – Localização da sub-bacia do córrego Chapadinha.

A sub-bacia do córrego Chapadinha é sensível em termos de qualidade de água, pois possui em seu território um grande aglomerado urbano – Brazlândia, necessitando de recuperação das áreas degradadas de cascalheiras, depósitos de lixo urbano sem qualquer tratamento e ordenamento no uso ocupação do solo (BRASIL, 1998). A vegetação nativa apresenta grandes sinais de degradação, provocada por cultivo e pastos. O estado de conservação encontra-se entre moderado e ruim, com a presença de veredas, campos de murundus em pequenas porções (BALBINO, 2007).

Atualmente, percebe-se que o território da sub-bacia do Chapadinha possui diversos conflitos socioambientais, devido o envolvimento de diversos atores com posicionamentos divergentes em torno do seu uso, tais como destinação à assentamentos e parques, pois, no final da década de 1980 e início da década de 1990, seu território se tornou objeto de excessiva apropriação. Evidencia-se que esses embates geram conflitos entre o desenvolvimento social, econômico e a sustentabilidade ambiental na região (COSTA, 2015).

3.4.2 Sub-Bacia do Ribeirão das Pedras

A sub-bacia do Ribeirão das Pedras apresenta uma área de drenagem de 80,85 km², correspondente a aproximadamente 18% da BHL D (FERRIGO, 2014), nela estão localizadas as áreas mais urbanizadas da bacia do Lago Descoberto, abrangendo as regiões administrativas de Taguatinga – RA III, Ceilândia – RA IX, Brazlândia – RA IV e Brasília – RA I. A rede hidrográfica se desloca para a direção oeste e é composta pelo córrego Currais que possui extensão de 7.561 metros, classe 2 e perene; o córrego Veredinha com comprimento de 2.466 metros, classe 4 e regime não perene e o córrego Capão Comprido que deságuam no Ribeirão das Pedras, estipulado como de classe 2, perene e extensão de 17.579 metros (SEDUH, 2019), cuja a vazão média mensal histórica é de 1,59 m³/s (ADASA, 2017). A Figura 3.6 apresenta a localização da sub-bacia.

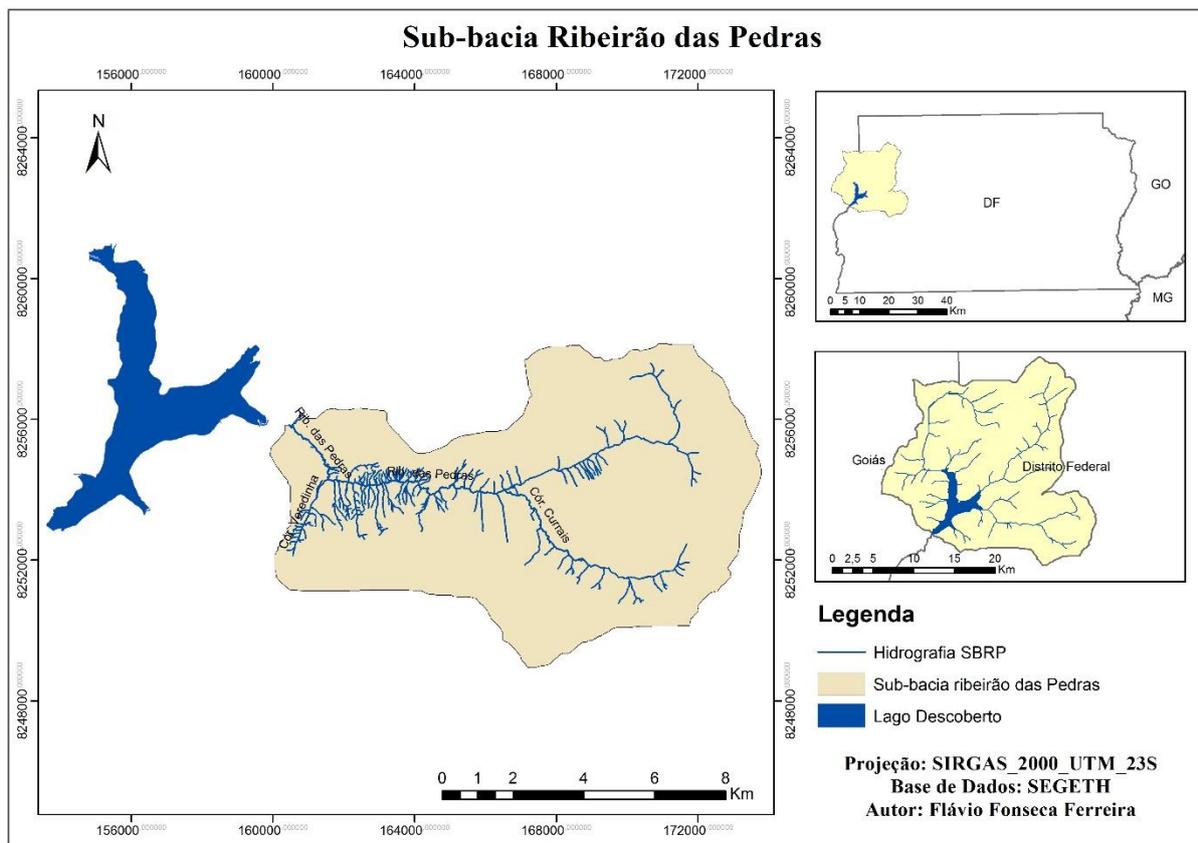


Figura 3.6 – Localização da sub-bacia do ribeirão das Pedras.

Na sub-bacia há três postos fluviométricos, sendo eles Pedras, Currais e Ribeirão das Pedras. Os dados obtidos no posto Ribeirão das Pedras na seção de saída da bacia são dados de monitoramento diário, enquanto os dados dos postos Currais e Pedras são medidos mensalmente (MMA, 2014)

De acordo com Silva et al. (2015) a bacia do Ribeirão das Pedras encontra-se em processo de degradação devido à ocupação de áreas legalmente protegidas, ausência de planejamento urbano, e falta de gestão integrada na região, agravados pelos fatores físicos específicos presente na bacia, tais como vales estreitos, vertentes dissecadas e solos susceptíveis aos processos erosivos.

A área da sub-bacia é coberta com cerrados, campos, murundus, pastos, plantios diversos e reflorestamento. Devido a sua proximidade com centros urbanos, sofreu uma grande ação antrópica (BRASIL, 1998). A vegetação da sub-bacia aos poucos está sendo substituída e

as áreas estratégicas para recargas de aquíferos (campo de murundu, veredas), estão sendo suprimidas para criação de pastos e parcelamento irregular de lotes (SILVA et al, 2015).

Com o aumento da urbanização na bacia, aliado à prática da agricultura e pecuária extensiva, o solo vem sofrendo um processo de impermeabilização, favorecendo o aumento do escoamento superficial, que associado ao relevo declivoso, promove acréscimo na velocidade do fluxo hídrico, resultando em processos erosivos e graves problemas de assoreamento em direção a jusante, com maior intensidade na foz do ribeirão das Pedras. Estas modificações na paisagem e uso e ocupação do solo afetam diretamente a dinâmica hidrológica, alterando os caminhos de circulação da água (SILVA et al., 2015).

Por ser a terceira área com maior influência para a BHL D o uso e ocupação dentro da sub-bacia do Ribeirão das Pedras é de extrema importância para qualidade e quantidade de água no lago do Descoberto.

3.4.3 Sub-Bacia do Ribeirão Rodeador

A sub-bacia do ribeirão Rodeador, que apresenta uma dimensão aproximada de 20.000 metros, fixado como classe 2 e com regime perene, é concebido a partir da confluência do córrego Jatobá, definido como classe 2 e comprimento de 4.523 metros e o córrego Cabeceira Comprida, classe 3 e extensão de 3.675 metros, ambos não perenes. Seu curso se encaminha pela direção sul até desembocar no lago descoberto e possui como principais afluentes os córregos Capoeira Chata, classe 4, extensão de 1.311 metros; córrego Guariroba; classe 5, extensão 1.065 metros; córrego do Meio, classe 3, extensão 2.447 metros; córrego Cristal, classe 4, extensão 2.378 metros; córrego Jatobazinho, classe 2, extensão 8.219 metros, córrego Fumabé, classe 3 e extensão de 2.277 metros, todos caracterizados como não perenes, exceto o córrego Jatobazinho. (SEDUH, 2019).

A sub-bacia localiza-se na margem nordeste do lago, apresentando uma área de aproximadamente 113,49 Km², cerca de 25% do total da área da BHL D, e vazão média de 1,62 m³/s (ADASA, 2017). Os cursos d'água que constituem a bacia do Rodeador são em sua maioria, canais de 1^a ordem, num total de 116 canais; 29 canais de 2^a ordem; 6 canais de 3^a

ordem; e o unicamente o ribeirão do Rodeador que é o canal principal de 4ª ordem. O perfil longitudinal do canal principal possui uma forma predominantemente convexa, fato esse que promove um processo de erosão e transporte em seu leito em aproximadamente 2/3 de seu curso, correspondente ao curso superior e médio, enquanto no curso inferior concentra-se a deposição de partículas e materiais, que conseqüentemente são carreados para o lago Descoberto (FALCOMER, 1994).

A sub-bacia do Rodeador possui áreas urbanas majoritariamente de baixa densidade e as vias não pavimentadas (FERRIGO, 2014). A sub-bacia é predominantemente agrícola, no qual a principal fonte de poluição apresenta caráter difuso, além de uma elevada retirada de água superficial e subterrânea para irrigação de áreas agrícolas, e possíveis lançamentos clandestinos de cargas de nutrientes proveniente da criação de animais (FIM, 2018). A Figura 3.7 mostra a localização da sub-bacia.

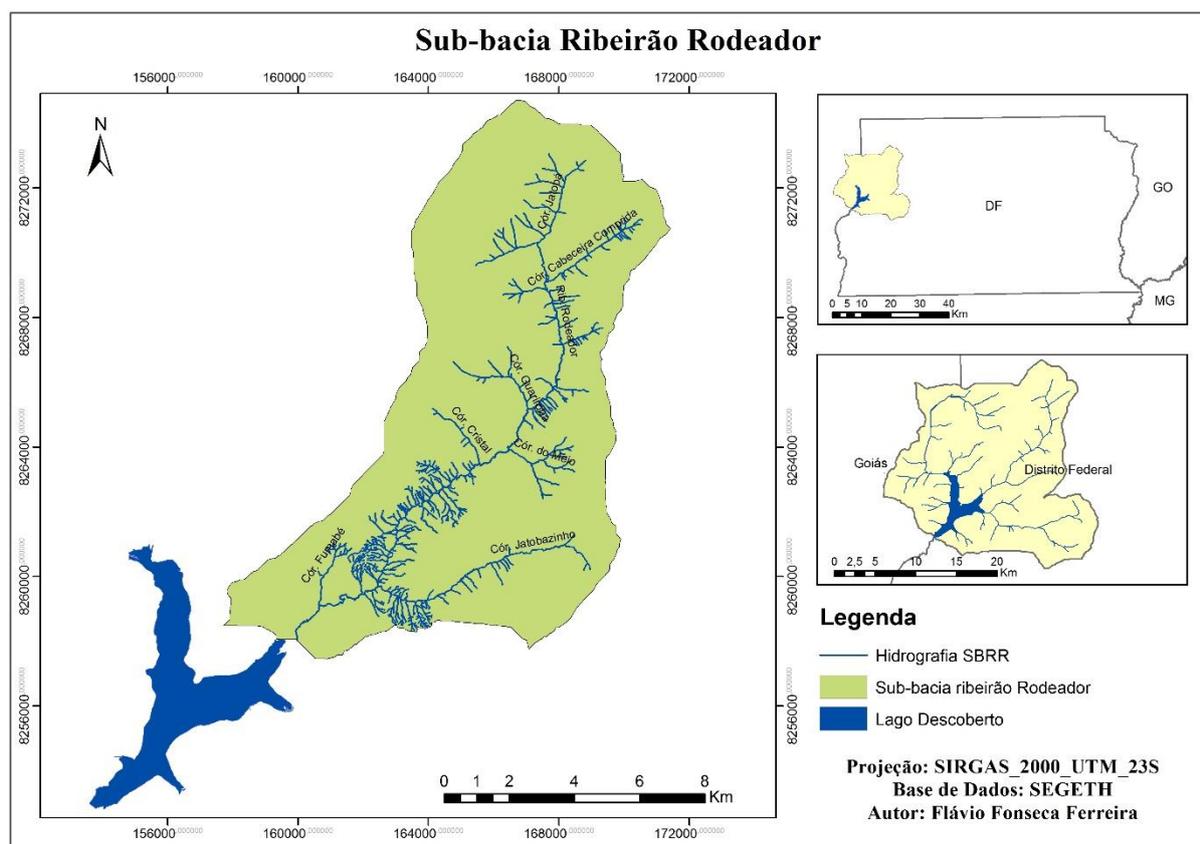


Figura 3.7 – Localização da sub-bacia do ribeirão Rodeador.

Os principais problemas que ocorrem na sub-bacia estão ligados a intensa ocupação por chácaras (uso indiscriminado de agrotóxicos e fertilizantes), assoreamento por transporte de sólidos, grande quantidade de canais para irrigação, altos níveis de erosão produzidos por escoamento concentrado de água associado a modificações antrópicas nas cabeceiras (BALBINO, 2007).

A supressão da área ocupada pela vegetação nativa teve como principal consequência mudanças na ecodinâmica, devido ao aumento da área antropizada, favorecendo e acelerando o processo de aluvionamento pela deposição de detritos no lago Descoberto, assim como a queda faunística presente na região (FALCOMER, 1994). A situação tende a se agravar com o aumento da população e da urbanização, cujas consequências são a maior demanda por água e impermeabilização do solo, diminuindo a infiltração e a recarga dos aquíferos que alimentam o lago e seus afluentes.

3.4.4 Sub-Bacia do Rio Descoberto

A sub-bacia do rio Descoberto em seu trecho superior, compreende as micro-bacias do córrego Capão da Onça, definido como classe 2, extensão de 6.490 metros e perene; córrego Bucanhão com extensão de 4.156 metros, não perene e classe 4; e córrego Barracão, classe 2, perene e comprimento de 5.438 metros (SEDUH, 2019). Suas nascentes localizam-se na região da chapada da Veredinha no planalto central, a uma cota de aproximadamente 1.250m, alcançando cota máxima de 1.340 m a Noroeste (NW), no divisor com a sub-bacia do Rodeador. A área de drenagem do Capão da Onça, que possui uma área de 7,2 Km² é considerada uma área de relevante interesse para a manutenção da qualidade da água no rio Descoberto (MMA, 2014).

Inicialmente o rio Descoberto segue na direção noroeste, a partir da confluência de seus formadores e dos córregos Buriti, que possui extensão de 1.611 metros, classe 4 e córrego Vendinha com comprimento de 2.055 metros com classe 5, ambos não perenes (SEDUH, 2019). Ao cruzar a rodovia BR-70, segue na direção sudoeste (SW) e recebe afluentes da região de Goiás e do território do Distrito Federal, tais como dos córregos Sumido, Lajinha, Zé Pires

com comprimento de 1501 metros, Cortado com extensão de 2.904 metros, possuindo ambos classe 4 e regime não perene (ADASA, 2017). Posteriormente, seguindo na direção sul, entra na região de influência do remanso provocado pela represa do Descoberto, na cota aproximada de 1.030 metros. (BRITO, 1999). A trajetória do rio Descoberto permanece seguindo na direção sul após transpassar a barragem do lago, no qual atravessa pela cidade de Santo Antônio do Descoberto - cota em torno de 1.000 metros - e deságua no rio Corumbá, na cota de 850 metros (MMA, 2014). A Figura 3.8 evidencia a localização da sub-bacia do rio Descoberto.

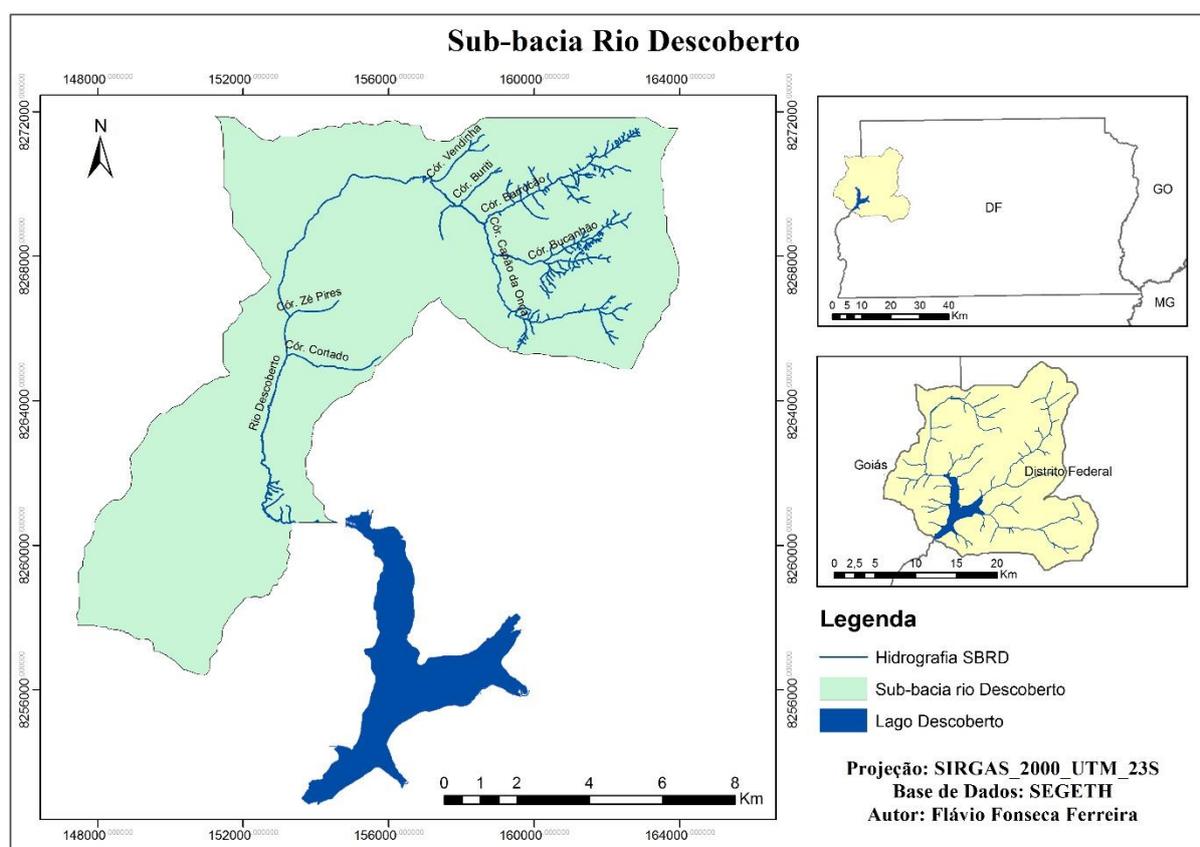


Figura 3.8 – Localização da sub-bacia do rio Descoberto.

A sub-bacia do rio Descoberto apresenta uma área de drenagem de aproximadamente 114 km², com seu exutório a montante do lago, possuindo área próxima de 25% da BHL, semelhante ao tamanho da sub-bacia do ribeirão Rodeador. O rio Descoberto possui uma extensão de aproximadamente 19.226 metros, classe 2 e perene (SEDUH, 2019). O monitoramento diário iniciado em maio de 1978 é realizado até os dias atuais. A vazão média do rio Descoberto à montante do lago ao longo dos anos é de 2,36 m³/s. Durante o período de

seca (maio a setembro) a média da vazão fica em torno de 1,2 m³/s, enquanto no período chuvoso alcança a média de 3 m³/s (MMA, 2014).

A sub-bacia do rio Descoberto apresenta danos ambientais menos intensos, as matas de galeria e as áreas de reflorestamento garantem uma boa conservação dos mananciais. A vegetação, sobretudo na área da sub-bacia que se encontra no estado do Goiás, se encontra bastante alterada, substituídas por pastos, reflorestamento e loteamentos. Chácaras e lotes atingem veredas, campos de murundus e matas de galeria (que são áreas de proteção permanente), além da presença de uma quantidade considerável de estradas e vias vicinais. A área é ocupada por reflorestamentos de espécies exóticas como os eucaliptos, observa-se áreas de grandes culturas (soja, grãos e leguminosas) utilizando pivôs centrais, coexistindo com culturas de subsistência e fruticulturas (BALBINO, 2007).

O estado geral de conservação da sub-bacia pode ser considerado moderado, porém as tendências de uso e ocupação do solo na região indicam a necessidade de estabelecer mecanismo de controle do processo de degradação ambiental.

3.4.5 Sub-Bacia do Córrego Olaria

A sub-bacia do córrego Olaria apresenta uma área de drenagem de 13,2 km², no qual representa um valor de área próximo a 3% em relação a BHL. A vazão média diária no córrego para o período observado é de 0,30 m³/s. (ADASA, 2017). O córrego Olaria com extensão de 6.026 metros possui como afluente o córrego Índio com um comprimento de 3136 metros, ambos definidos como classe 2, regime não perene (SEDUH, 2019). O maior valor de vazão registrado é de 2,63 m³/s e o de menor valor é de 0,026 m³/s (MMA, 2014).

As cotas planialtimétricas variam de 1040 metros a 1230 metros, no qual o terço superior da bacia apresenta relevo plano, enquanto na direção ao entalhamento, sua topografia começa a ficar levemente ondulada com alguns trechos fortemente ondulados (EMPRAPA, 2001). A Figura 3.9 evidencia a localização da sub-bacia.

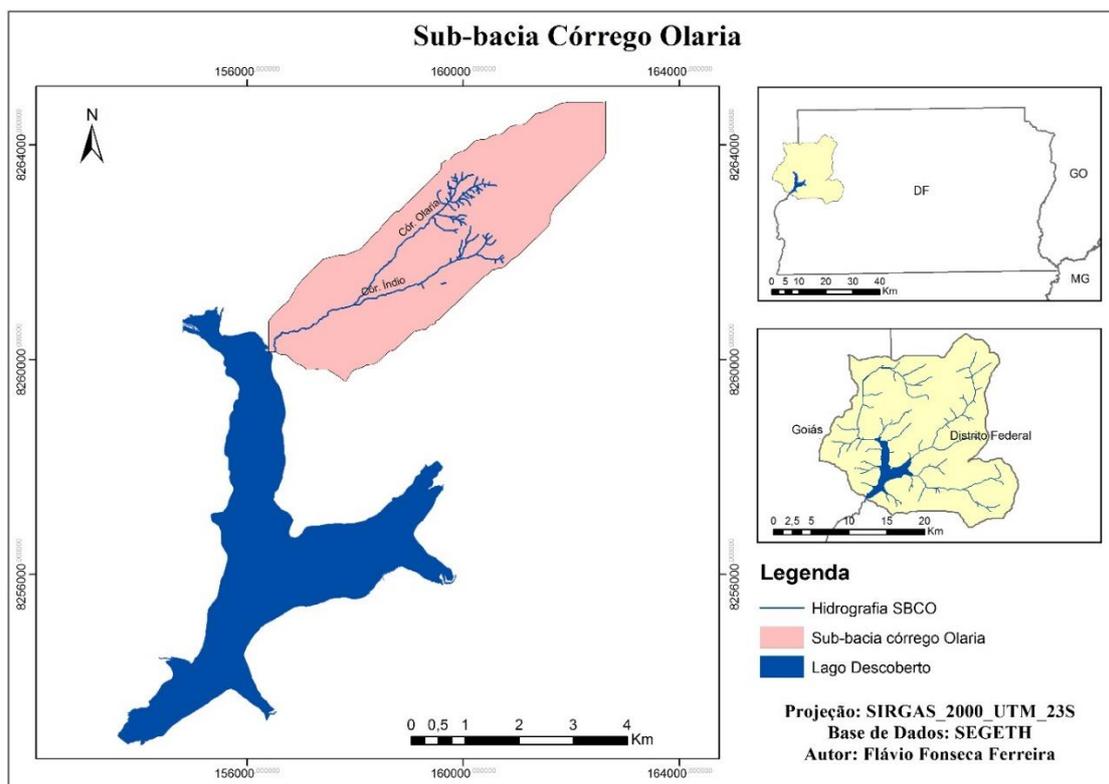


Figura 3.9 – Localização da sub-bacia do córrego Olaria.

Caracteriza-se por ser uma bacia de uso agrícola familiar, as áreas médias e mais baixas da sub-bacia são utilizadas como plantações de culturas diversas e por pastagens. Praticamente a vegetação nativa foi retirada e substituída por agricultura, pastagens, exploração de cascalho e plantios de espécies exóticas e eucaliptos (BALBINO, 2007).

3.4.6 Sub-Bacia do Córrego Capão Comprido

O córrego Capão Comprido é definido como um curso d'água classe 2, com extensão de 5.816 metros, regime perene e afluente do ribeirão das Pedras (SEDUH, 2019). A sub-bacia do córrego Capão Comprido corresponde a cerca de 3,5 % do território da BHL D, abrange uma área de 16,6 km² de drenagem e apresenta uma média anual de vazão histórica de 0,36 m³/s. (ADASA, 2017). Pela diferença da área de drenagem em relação à sub-bacia do córrego Rodeador nota-se uma significativa diferença de contribuição quantitativa entre as duas sub-bacias. A Figura 3.10 apresenta a localização da sub-bacia.

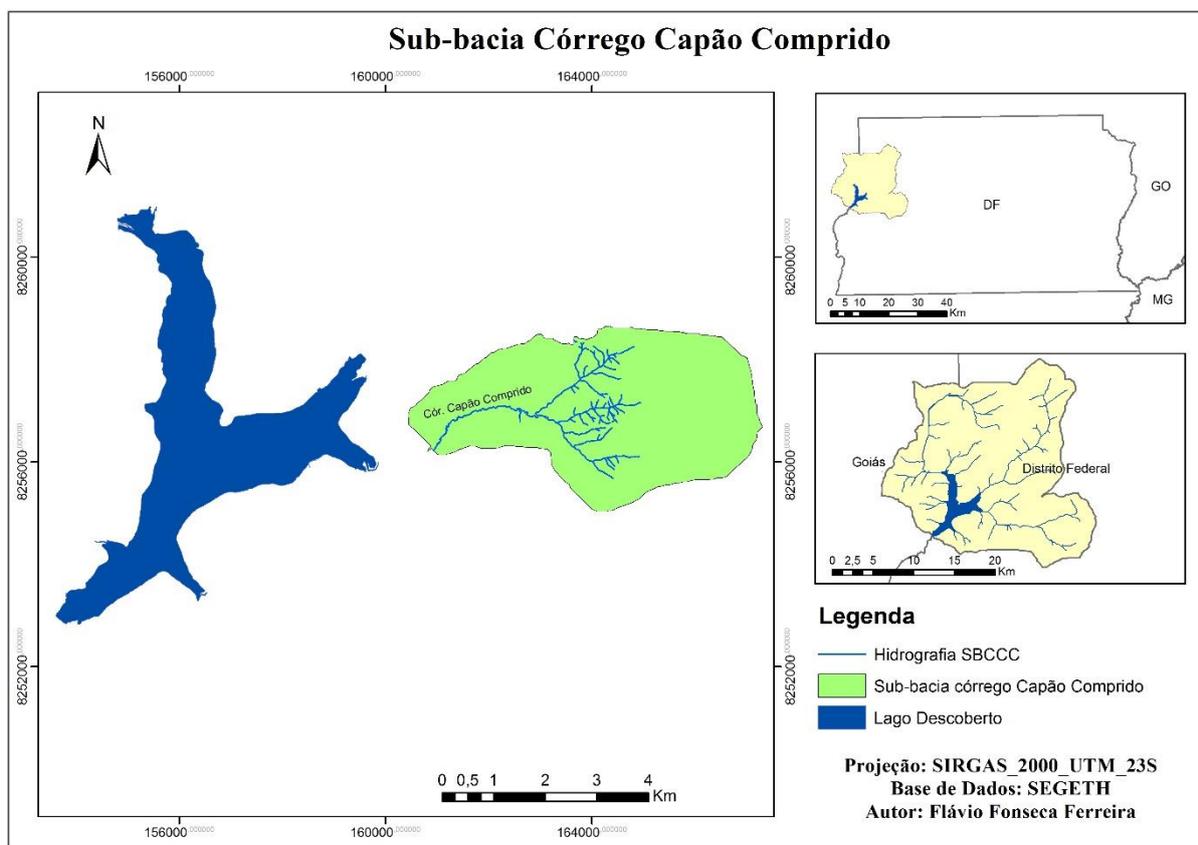


Figura 3.10 – Localização da sub-bacia do córrego Capão Comprido.

Atividades predominantemente rurais caracteriza o uso do solo na sub-bacia do córrego Capão Comprido, onde são exploradas a agricultura e pecuária em pequenas propriedades, em média 10 hectares. Os principais produtos cultivados são: cenoura, beterraba, alface, brócolis, couve, coentro, cebolinhas, rúcula, vagem, berinjela, batata-doce, goiaba, entre outros. (NASCIMENTO et al., 2000). A cobertura do solo também é composta por mata ciliar, reflorestamento e remanescentes de vegetação nativa, constituídas por fisionomias de campo limpo, de campo cerrado e de cerrado. Na área de cabeceira do córrego é possível encontrar campos em bom estado de conservação, enquanto que as áreas de cerrado em sua grande parte foram substituídas pela agricultura (FERNANDES, 2005). Além disso, observa-se ainda na região, a presença de muitas chácaras de lazer e recreação.

3.5 Planejamento e Gestão dos recursos Hídricos

O Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal (PGIRH/DF) abrange um conjunto de bacias hidrográficas inseridas no Distrito Federal e em partes de seu entorno, totalizando uma área de 8.760 Km², sendo mais da metade no Distrito Federal. Essa área é composta por dez municípios goianos (Águas Lindas de Goiás, Cidade Ocidental, Cristalina, Formosa, Luziânia, Novo Gama, Padre Bernardo, Planaltina, Santo Antônio do Descoberto e Valparaíso de Goiás) e pelo Distrito Federal. Com população residente em 2010 de 2.570.160 pessoas no Distrito Federal e 937.057 pessoas no entorno.

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) apresenta, entre outros objetivos, assegurar à atual e às gerações futuras a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, igualmente, define as diretrizes gerais de ação que estabelecem a indispensável integração da gestão das águas com a gestão ambiental. De acordo com a Lei nº 9.433/1997, os instrumentos da PNRH são os seguintes: os planos de recursos hídricos, o enquadramento dos corpos de água, a outorga do direito de uso dos recursos hídricos, a cobrança pelo uso dos recursos hídricos, o sistema de informações sobre recursos hídricos e a compensação a municípios (MMA, 2006).

A Figura 3.11 apresenta uma divisão dos setores envolvidos e as atividades envolvidas que necessitam de água, demonstrando que é necessária uma integração dos diversos setores para que os conflitos sejam amenizados e que sejam atendidos todos atores envolvidos.

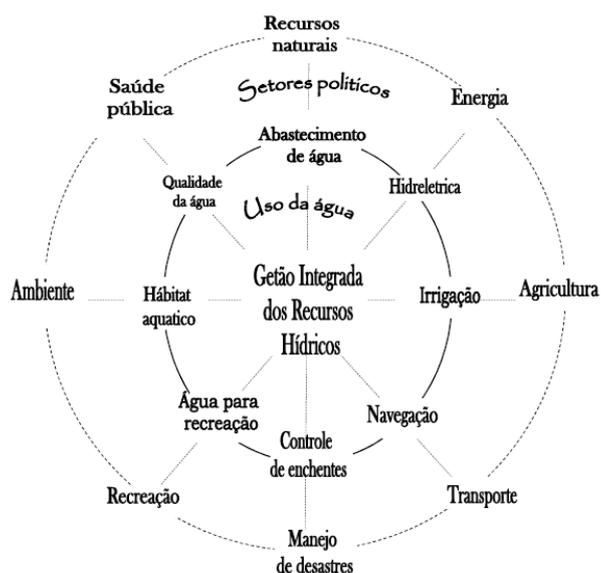


Figura 3.11 - Integração da gestão da água por setores (Adaptado - GRIGG, 2008).

No desenvolvimento do planejamento dos recursos hídricos é preciso considerar o problema da escassez e distribuição da água, originado pelos acelerados processos de expansão urbana, o aumento da demanda, a degradação da qualidade dos recursos hídricos e a alocação da água entre usos múltiplos (MONSALVE-HERRERA, 2013).

Segundo Monsalve-Herrera (2013) para gerenciar as questões intervenientes, existem ações que podem contribuir com a gestão da qualidade dos recursos hídricos, tais como: a caracterização ambiental, a avaliação dos impactos das atividades na área de influência, determinação da capacidade de assimilação de um corpo receptor, o monitoramento ambiental e a retroalimentação do processo de gestão.

Estudos hidrológicos em grandes rios são comuns em nosso país tendo em vista o interesse do setor elétrico, porém a captação de água na região do DF é feita predominantemente em pequenos córregos. O desenvolvimento de atividades diversas dentro das médias e pequenas bacias hidrográficas, com o conseqüente aumento da demanda de água dos corpos d'água, torna-se cada vez mais importante a adequada gestão do uso da água, como demonstrado por modelos que utilizam dinâmica de sistemas (SÁNCHEZ-ROMÁN et al., 2009).

3.5.1 Recursos Hídricos no Distrito Federal

O Distrito Federal (DF) caracteriza-se por estar situado na cabeceira de afluentes de três grandes regiões hidrográficas: Tocantins/Araguaia, São Francisco e Paraná. A Agência Nacional de Águas (ANA) classifica o DF como uma região de “baixa garantia hídrica” e suas bacias como “trechos críticos” (BRASIL, 2012). A preservação das águas do Distrito Federal se torna fator essencial, pois sua disponibilidade hídrica local é mais restrita comparada com cidades e núcleos urbanos que se encontram a jusante. O manejo adequado dos recursos hídricos e o aproveitamento sustentável da água disponível no DF, sem depender da importação das águas de mananciais situados em municípios limítrofes, requer um bom planejamento e incluem as principais ações a seguir: (DISTRITO FEDERAL, 2018).

- Medidas que promovam a retenção das águas de chuva no solo, a recarga do aquífero subterrâneo, a restauração da vegetação ciliar e a proteção de nascentes; e
- O tratamento dos esgotos e das águas de primeira chuva, responsáveis pela poluição

dos corpos hídricos que abastecem ou poderão abastecer o DF.

O clima e a morfologia do DF determinam as limitações quantitativas nos recursos hídricos, maiores quantidades de água são necessárias para que sejam atendidas determinadas demandas e atividade específicas, relacionadas aos aspectos de desenvolvimento econômico e social (ADASA, 2012).

Atualmente, O sistema de abastecimento de água do Distrito Federal é composto por cinco sistemas produtores, denominados Descoberto, Torto-Santa Maria, Sobradinho-Planaltina, Brazlândia e São Sebastião. Dentre esses sistemas, o reservatório do lago do Descoberto é responsável pela maior parte do abastecimento do DF. Além desse sistema, a Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) também realiza captações na Bacia do Paranoá e do Ribeirão Bananal (CAESB, 2018).

ANA (2010) apresentou estudos de demandas e disponibilidades de água projetadas para o ano 2015 e mostra que os sistemas de abastecimento necessitariam de um reforço proveniente de um novo manancial a fim de atender à população. Há dois empreendimentos importantes que irão ampliar o abastecimento de água no Distrito Federal, o reservatório Corumbá IV que está em fase de obras e o lago Paranoá, no qual se encontra na etapa de planejamento e concepção de projeto, a oferta hídrica aumentaria em 8,2 m³/s com as obras concluídas. O sistema Corumbá IV será operado conjuntamente pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) e a Empresa de Saneamento de Goiás (SANEAGO).

Alencar et al. (2006) descrevem o DF como uma região de nascentes, caracterizada pela presença de córregos e pequenos rios. Apesar de ter seus cursos de água perenes, verifica-se uma redução muito grande da vazão no final do período de seca, que se estende de abril a outubro. Dessa maneira, evidencia-se a importância de estudar as características das vazões em pequenas bacias hidrográficas do DF.

3.5.2 Crise Hídrica no Distrito Federal

Segundo a Caesb (2014), a crise hídrica é uma realidade brasileira e seus efeitos podem ser evidenciados em várias localidades, por exemplo, no Distrito Federal - DF, onde os fatores

climáticos e geográficos, influenciam uma das piores séries pluviométricas da história da capital brasileira.

O Distrito Federal vem sofrendo os efeitos das mudanças climáticas e degradação do meio ambiente, possuindo como principais causas a supressão da vegetação nativa e típica do Cerrado, captações irregulares de água, ocupações irregulares que ocasionaram a impermeabilização do solo e assoreamento de mananciais e nascentes. Nos últimos anos, tem-se observado que os índices de precipitação no Distrito Federal mantiveram-se abaixo da média, contribuindo para diminuição dos níveis dos reservatórios, tanto do Descoberto quanto o de Santa Maria (DISTRITO FEDERAL, 2017).

A pluviosidade nos últimos três anos manteve-se abaixo da média, provocando a redução da vazão dos três principais tributários - Rio Descoberto, Ribeirão Rodeador e Ribeirão das Pedras. Além disso, ausência de obras estruturantes por mais de 16 anos impactaram diretamente o sistema de abastecimento de Brasília (DISTRITO FEDERAL, 2017).

Abaixo é apresentado as principais informações obtidas a partir de dados fluviométricos, pluviométricas e de nível do reservatório provenientes da rede de monitoramento hidrológico que a CAESB mantém na bacia do Reservatório do Rio Descoberto.

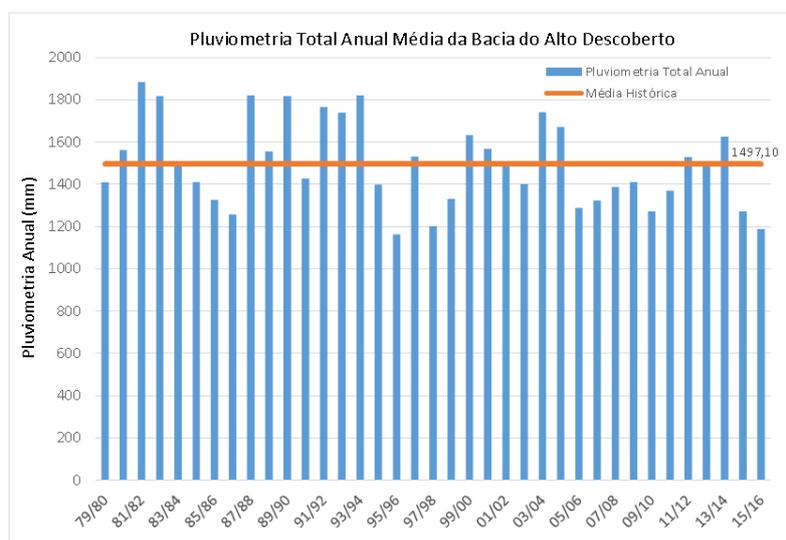


Figura 3.12 - Pluviometria Média Bacia do Alto Descoberto 1979-2016. (Estações: ETA RD, ETA Brazlândia e Descoberto Barragem). (Fonte: CAESB, 2014).

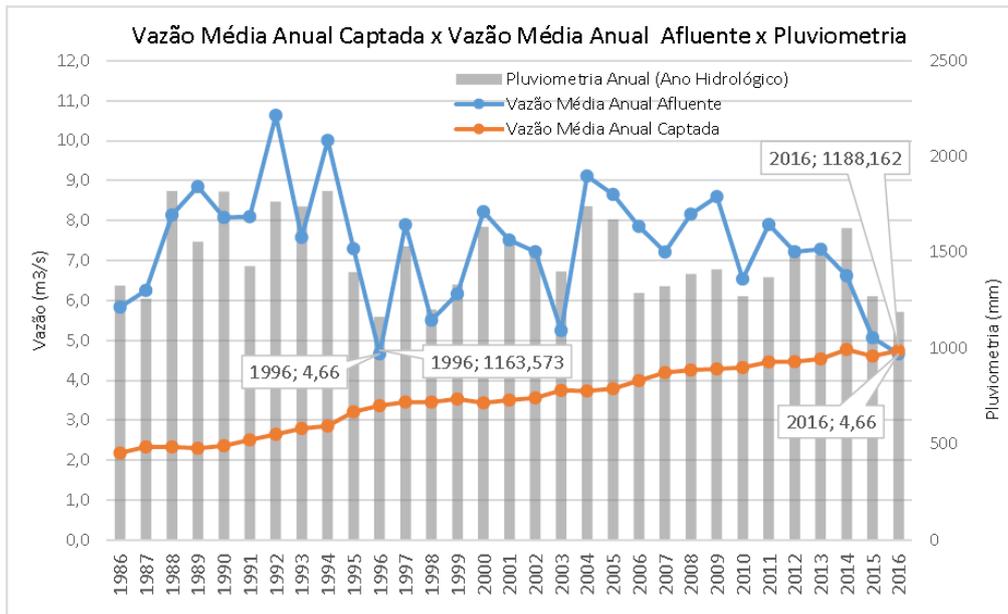


Figura 3.13 – Pluviometria, vazão média anual afluente e vazão média captada para abastecimento urbano proveniente da Bacia do Alto Descoberto entre 1979-2016. (Estações: ETA RD, ETA Brazlândia e Descoberto Barragem). (Fonte: CAESB, 2014)

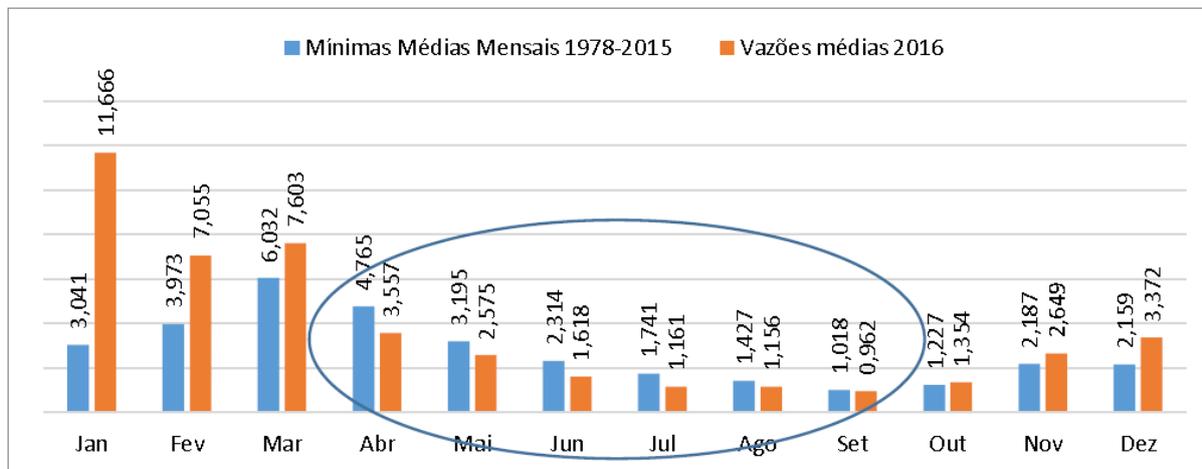


Figura 3.14 - Comparação entre as vazões médias mensais registradas em 2016, com as mínimas vazões médias mensais de toda a série histórica (1978-2015) (Fonte: CAESB, 2014).

Observa-se a partir dos dados pluviométricos da Figura 3.12 que nos anos hidrológicos (2014-2015 e 2015-2016) a pluviosidade foi abaixo da média, com alturas pluviométricas de 1271,8 mm e 1188,2 mm respectivamente, sendo que este último foi o mais seco dos últimos 20 anos e o segundo mais seco de toda a série de monitoramento. A comparação entre pluviosidade total anual na bacia, a vazão média anual afluente e a vazão média anual captada

presente na Figura 3.13, percebe-se que as vazões médias anuais afluentes nos anos de 2015 e 2016 foram muito baixas. Na Figura 3.14 a partir da série histórica, que abrange o período 1978 a 2015, compara-se as vazões médias mensais registradas no ano de 2016 com as mínimas vazões médias mensais de toda a série, observa-se que de abril a setembro de 2016 foram registradas as menores vazões médias afluentes ao reservatório (DISTRITO FEDERAL, 2017).

3.6 Modelos Hidrológicos

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, e tem como objetivo contribuir e sustentar o entendimento dos processos que envolvem esta realidade, ou seja, um modelo de modo geral possui equações matemáticas e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros, afim de reproduzir determinado sistema (RENNÓ & SOARES, 2000). Segundo o mesmo autor, os modelos hidrológicos frequentemente podem descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, o movimento da água no solo causado pela infiltração, percolação, entrada e saída de água subterrânea, o escoamento superficial, subsuperficial e nos canais de escoamento

Tucci (1998) apresenta algumas definições para compreensão e entendimento do sistema e do modelo que o representa. Tratam-se dos conceitos de “fenômeno”, “variável” e “parâmetro”. Segundo este autor, fenômeno é um processo físico que produz alteração de estado no sistema como, por exemplo, a precipitação, a evaporação e a infiltração. Variável, por sua vez, é um valor que descreve quantitativamente um fenômeno variando no espaço e no tempo como, por exemplo, a vazão que descreve o estado do escoamento. Já os parâmetros são valores que caracterizam o sistema, também podendo variar com o espaço e com o tempo como, por exemplo, a rugosidade de uma seção de um rio.

Os modelos podem ser classificados sob diferentes aspectos. Comumente, são classificados de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrado ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos).

De acordo com Tucci (1998) a simulação hidrológica é influenciada pela heterogeneidade física da bacia hidrográfica e pelos processos envolvidos, ou seja, modelos se

diferenciam em função dos dados utilizados, da discretização, das prioridades da representação dos processos, da escala espacial e temporal e dos objetivos a serem alcançados.

A simulação de praticamente toda a bacia hidrográfica por meio da integração de diferentes componentes do ciclo hidrológico foi possível somente com o início da revolução digital na década de 1960. A partir deste período, estudos sobre modelagem hidrológica avançaram e foram desenvolvidos e aprimorados, originando modelos que variam de acordo com os objetivos e a escala de aplicação, desde modelos voltados para o dimensionamento de reservatórios até os que preveem alterações nas vazões de uma bacia devido a mudanças climáticas. (FERRIGO et al., 2013).

A aplicação de modelos hidrológicos no gerenciamento de recursos hídricos tem se popularizado em função da necessidade de planejar o uso futuro da água, conciliando os interesses econômicos, sociais e ambientais. A aplicação de modelos tem possibilitado a previsão de cenários para as modificações em bacias, implementação de práticas sustentáveis de manejo, além de servir como ferramenta na definição de políticas ambientais (NUNES, 2016). A busca de ferramentas que possam contribuir para uma melhor interpretação de informações acerca dos impactos provocados pelos diversos tipos de uso da terra em corpos hídricos inseridos em bacias hidrográficas é importante para o planejamento, uma vez que a qualidade da água e do solo refletem diretamente na qualidade de vida da população humana de demais seres vivos (MINOTI, 2006).

A quantidade e qualidade da água, estimativa de cargas de poluição por fontes difusas, produção de sedimentos, mudanças no uso do solo, aplicação de práticas sustentáveis e medidas de gestão e gerenciamento dos recursos hídricos são temas estudados na modelagem de bacias hidrográficas. O SWAT é um modelo hidrológico que tem sido utilizado para avaliar as alterações no regime hidrológico e na qualidade da água de bacias hidrográficas em função das mudanças de suas variadas características.

A utilização de modelos hidrológicos tem sido bastante difundida e suas aplicações na representação do comportamento de bacias hidrográficas têm apresentado resultados representativos, tanto na simulação e previsão de cenários hipotéticos para avaliação de impactos, bem como ferramenta na elaboração de projetos hidrológicos ou hidráulicos (Marinho et. al., 2013). Para se fazer uso desse tipo de modelo de forma adequada, é necessário que se tenha plena compreensão do funcionamento do modelo, bem como de suas limitações.

Na gestão dos recursos hídricos, os modelos hidrológicos são ferramentas bastante úteis, pois além de representar os processos hidrodinâmicos permite simular previsões com base no levantamento e interpretação de dados e observações de campo.

3.6.1 SWAT

O SWAT é um modelo em escala de bacia hidrográfica e foi desenvolvido no Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), com o objetivo de prever o impacto de práticas de manejo da terra e da água, produção de sedimentos e agroquímicos em bacias hidrográficas complexas com diferentes usos e tipos de solo, tendo como base longos períodos de tempo (NEITSCH et al., 2005).

O SWAT pode ser considerado um modelo determinístico, semiconceitual, contínuo, semidistribuído e dinâmico. O modelo é considerado semiconceitual porque possui base física robusta, mas alguns processos ainda são simulados de maneira empírica. É considerado semidistribuído por é distribuído no âmbito da bacia, mas concentrado quanto à Unidade de Resposta Hidrológica (Moriassi *et al.*, 2007).

A simulação com o SWAT é realizada a partir do delineamento da bacia a partir de uma partição em sub-bacias que irá conter pelo menos uma unidade de resposta hidrológica (HRU), um canal afluente e um canal principal. As HRUs são porções da sub-bacia que têm atributos únicos de uso de solo, tipo de solo e declividade e são consideradas hidrológicamente homogêneas em toda sua área. O programa assume que não há interação entre as HRUs na sub-bacia, os cálculos são feitos separadamente e no final são somados para obter as cargas de nutrientes, escoamento com sedimentos, dentre outros processos que ocorrem na sub-bacia (MONSALVE-HERRERA, 2013).

A subdivisão da bacia hidrográfica em HRUs permite que o modelo determine as diferenças na evapotranspiração decorrentes dos diversos manejos e solos existentes em cada sub-bacia. O escoamento superficial é estimado separadamente para cada HRU para depois ser obtido o escoamento total para a bacia hidrográfica. Esse processo aumenta a exatidão e fornece uma melhor descrição física do balanço hídrico.

Segundo Arnold et al. (2012) na simulação hidrológica da bacia, o SWAT separa a análise dos fenômenos e processos em duas partes. A primeira etapa é a fase terrestre do ciclo hidrológico, que controla as quantidades de água, sedimento, nutrientes e cargas de pesticidas

que atingem o canal principal do rio em cada sub-bacia. A segunda etapa é a fase aquática do ciclo hidrológico, que está relacionada com o movimento da água, sedimentos, nutrientes entre outros através da rede hídrica da bacia em direção ao seu exutório.

O principal componente hidrológico do modelo é o escoamento superficial, que atua diretamente no transporte de sedimentos, nutrientes e outros contaminantes. Para simular satisfatoriamente o volume de escoamento gerado, deve ser realizada uma análise do balanço hídrico da bacia e uma possível calibração dos componentes hidrológicos que estão relacionados a vazão, se a resposta hidrológica não for aceitável, os outros processos também não serão (CARVALHO, F. H., 2014).

O escoamento superficial pode ser calculado por intermédio de uma modificação do método do Soil Conservation Service (SCS) ou pelo método de infiltração de *Green & Ampt*. O SWAT realiza o cálculo dos componentes do escoamento recorrendo à equação do balanço hídrico e aos modelos de fluxo adaptados às condições de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo. Estes volumes de água são seguidamente conduzidos até a rede de drenagem e ao longo desta até ao ponto mais a jusante da bacia hidrográfica no qual é contabilizado o valor total de produção de água (ARNOLD et al., 2012).

O SWAT necessita de dados específicos, como o modelo digital de elevação, mapa de solo, mapa de uso e ocupação da terra, todos estes necessários para a formação das HRUs, e os dados climáticos, para descrever a relação entre as variáveis de entrada e saída. Os processos físicos associados ao movimento da água e dos sedimentos, crescimento de plantas, ciclagem de nutrientes e outros, como exemplo, são modelados diretamente pelo SWAT utilizando os dados de entrada mencionados (NEITSCH et al., 2005). A calibração das simulações de vazão utiliza séries históricas obtidas em estações fluviométricas, podendo ser dados diários ou mensais (FERRIGO, 2014).

A partir de estudos promissores com a utilização do modelo SWAT em diversos locais do mundo, esse modelo torna-se uma alternativa para obtenção de resultados e fundamentação científica, motivando discussões e propostas de soluções aos problemas ambientais em bacias hidrográficas, tornando sua aplicação confiável e comprovada, a fim de auxiliar gestores ambientais (UZEIKA, 2009).

Nos últimos 10 anos, trabalhos começaram a ser realizados com o SWAT no Distrito Federal. Os trabalhos se concentram, majoritariamente, nas bacias do Ribeirão Pípiripau e do Rio Descoberto. Salles (2012) aplicou o modelo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pípiripau,

localizada na região nordeste do Distrito Federal. Salles (2012) simulou as vazões desta bacia para um período de 10 anos. O modelo foi calibrado manualmente em relação à vazão média mensal observada da estação fluviométrica localizada próximo ao exutório da bacia. Os resultados foram considerados bastante satisfatórios. Sarmiento (2010) utilizou o modelo SWAT aplicado à previsão de vazões na bacia do Rio Descoberto-DF em trabalho que visou a análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação. De acordo com a autora, a avaliação dos dados e a aplicação de um método de calibração adequado é crucial para uma consistente análise de incertezas do modelo e para o sucesso da modelagem.

Ferrigo (2014) realizou a análise de sensibilidade do modelo para 14 parâmetros escolhidos pelo grau de importância durante a simulação inicial do modelo e efetuou a calibração dos parâmetros em nível diário para os anos hidrológicos de 2005 a 2010 para a sub-bacia do rio Descoberto (SBRD), os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, tendo sido obtido um coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,4 e um coeficiente de determinação (R^2) de 0,44.

O modelo SWAT, desde sua criação, vem ganhando destaque dentre os modelos de simulação hidrológica. Gradualmente, ele vem ampliando suas fronteiras no ambiente acadêmico e científico. As razões para isso estão principalmente no perfil de modelagem, muito completo, que engloba vários parâmetros hidrológicos e agronômicos, tornando-o um modelo versátil para auxiliar órgãos públicos e pesquisadores na tomada de decisão ante situações conflitivas do uso do solo que possam resultar em processos erosivos (CHU *et al.*, 2004).

O modelo SWAT vem se destacando entre os modelos de simulação hidrológica. Gradualmente, ele vem ampliando suas fronteiras no ambiente acadêmico e científico. As razões para isso estão principalmente no perfil de modelagem, muito completo, que engloba vários parâmetros hidrológicos, tornando-o um modelo versátil para auxiliar órgãos públicos e pesquisadores na tomada de decisão ante situações conflitivas do uso do solo que possam resultar em processos erosivos (CHU *et al.*, 2004).

Existem diversos programas computacionais que são dedicados à manipulação e tratamento de dados geográficos e espaciais. Dentre estes encontra-se o QGIS, um programa computacional de código aberto e que permite o funcionamento em diversas plataformas. O QGIS disponibiliza um número de aplicações em constante crescimento através das funções nativas e de complementos, e dentre elas encontra-se o QSWAT, uma extensão que pode ser

adiciona ao QGIS a fim de proporcionar uma interface para o modelo SWAT e suas diversas funções.

Além de ser computacionalmente eficiente, com metodologia robusta e interface amigável, o SWAT se diferencia de outros modelos pela excelente documentação e transparência. Através da internet (<http://swat.tamu.edu/>) o usuário tem acesso a uma série de manuais e documentos oficiais do modelo, que explicam de forma detalhada sua metodologia e funcionamento. No mesmo *website* o usuário pode obter gratuitamente o modelo, assistir a vídeos explicativos e tutoriais sobre a instalação e uso do SWAT (CARVALHO, F. H., 2014).

3.6.2 SWAT-CUP

A calibração de um modelo é definida como o ajuste dos parâmetros do modelo comparando um conjunto de dados obtidos das simulações para determinadas condições com um conjunto de dados observados para estas mesmas condições. A validação do modelo envolve a simulação utilizando os parâmetros de entrada mensurados ou determinados na calibração (Moriasi et al., 2007).

A calibração consiste na adaptação dos parâmetros como forma de adequar o resultado da simulação aos dados observados. A calibração do modelo pode ocorrer de várias formas, sendo uma delas manualmente, onde é realizada o ajuste de cada variável individualmente afim de igualar o máximo possível aos dados reais (AGUIAR, 2016). A calibração automática de um modelo exige que seus parâmetros sejam sistematicamente alterados. Em seguida, o modelo é executado, e os *outputs* necessários são extraídos dos arquivos de saída e comparados com os valores observados correspondentes (FERRIGO, 2014).

O modelo SWAT possui um programa externo desenvolvido para a análise de incerteza, conhecido como o SWAT-CUP (Calibration e Uncertainty Program), desenvolvido por Abbaspour *et al.* (2007) e que foi uma importante contribuição, por realizar o processo de calibração e validação de maneira automática (Brighenti et al, 2015). A interface SWAT-CUP permite realizar as etapas de análise de sensibilidade, calibração e validação e análise de incerteza, por meio de cinco algoritmos diferentes (SUFI-2, GLUE, ParaSol, PSO e MCMC). A principal função de uma interface é fornecer essa ligação entre a entrada/saída de um programa de calibração com o modelo.

No presente estudo foi utilizado o algoritmo SUFI-2 para a análise de incerteza, no qual leva em consideração incerteza em variáveis de entrada, os conceitos e simplificações do modelo, as incertezas dos parâmetros e dados medidos. O grau para o qual todas as incertezas são contabilizadas é quantificado por uma medida referida como o *P-factor*, que é a porcentagem dos dados medidos delimitados pela incerteza de predição de 95%. Outra medida que busca quantificar a eficiência de uma análise de calibração e incerteza é o *R-factor*, que é a espessura média da banda 95PPU dividida pelo desvio padrão dos dados medidos. O SUFI-2 tenta lidar com uma banda menor possível de incerteza (FERRIGO, 2014).

Segundo Ferrigo (2014) A confiabilidade do ajuste e do grau de eficiência do modelo calibrado para as incertezas são avaliados pelo *P-factor* e *R-factor*. Teoricamente, o valor para o *P-factor* varia entre 0 e 100%, enquanto que o *R-factor* varia entre 0 e infinito. O *P-factor* de 1 e o *R-factor* de 0 indicam uma simulação que corresponde exatamente aos dados medidos.

A fim de buscar e discutir os parâmetros que influenciam as diferentes etapas de simulação do modelo SWAT, diversos estudos foram realizados que demonstram a importância da análise de sensibilidade e calibração do modelo, resultando assim em uma representação mais fiel da realidade (FERRIGO, 2014).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A aplicação do modelo SWAT, por meio da extensão QSWAT adicionada a plataforma de manipulação de dados geográficos QGIS, exige como dados de entrada, a utilização de dados de declividade, uso e cobertura do solo, e pedológicos para realizar a simulação. Posteriormente, é necessário que seja feita uma calibração com base em dados observados na bacia para que os resultados simulem um cenário hipotético mais próximo da realidade física.

Os dados utilizados para a análise, terão como período de 1997 a 2017, no qual de 1997 a 2000 será aplicado no aquecimento do modelo, o ano de 2001 a 2010 aplicado na calibração, e dados de 2011 a 2017 utilizados na verificação do modelo.

A simulação de cenários tem como objetivo verificar a influência da mudança de uso e cobertura do solo na vazão dos tributários do lago Descoberto. Os cenários simulados são:

- Cenário 1: Preservado (presença de vegetação nativa e cerrado);
- Cenário 2: Uso e cobertura do solo atual (áreas de cerrado, agricultura, pastagem e zonas urbanas);
- Cenário 3: Antrópico (crescimento de zonas urbanas e áreas de agricultura).

A metodologia proposta para o desenvolvimento do projeto será composta por etapas presentes na Figura 4.1

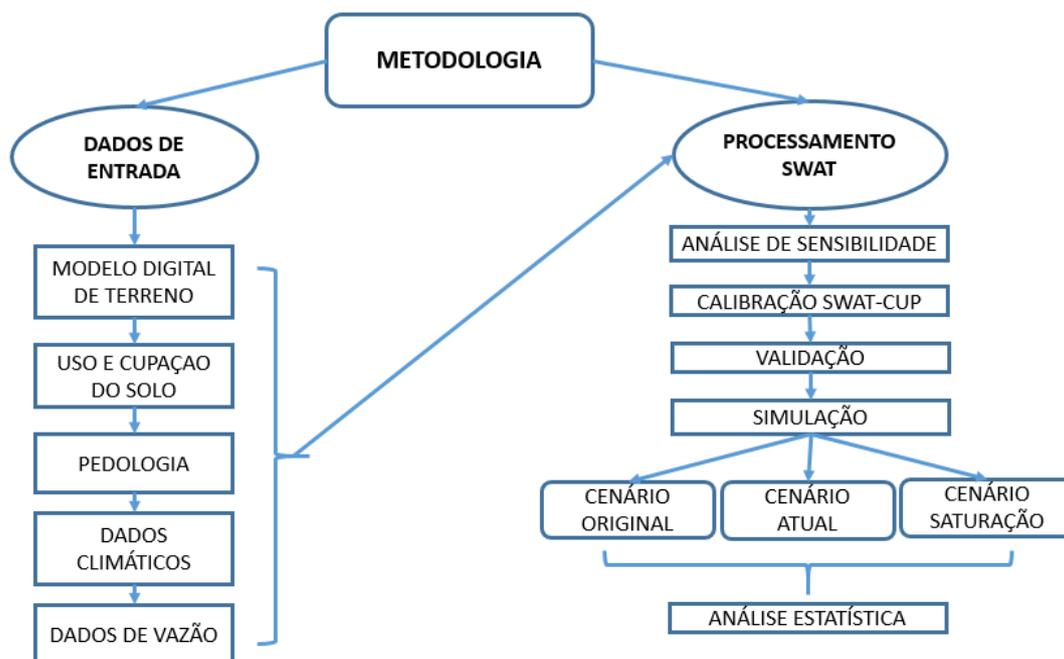


Figura 4.1 - Esquema metodológico das etapas de trabalho. Fonte: Elaborado pelo Autor.

A metodologia de trabalho divide-se nos seguintes tópicos, tais como:

Construção da Base de Dados: inclui o modelo digital de terreno, mapa de uso e cobertura do solo, mapa de tipos de solos (pedologia), dados climáticos e dados de vazão;

Modelagem SWAT: compreende a análise de sensibilidade dos parâmetros, calibração com o programa SWAT-CUP, verificação, simulação de cenários e análise dos resultados para efeito de comparação.

Os programas computacionais utilizados são os seguintes:

- QGIS 2.6.1 – Plataforma SIG para manipulação e edição de dados geográficos;
- QSWAT 1.5 – Extensão utilizada para aplicar o modelo SWAT no QGIS;
- SWAT Check – Ferramenta do QSWAT, utilizada para visualizar, de forma resumida, os resultados obtidos na simulação;
- SWAT-CUP – Programa para realizar a análise de sensibilidade, calibração e verificação dos resultados obtidos do modelo SWAT;

4.1 Base de Dados

A base de dados necessária à modelagem da BHL D com o modelo SWAT são essencialmente o modelo digital de terreno, base cartográfica de uso e ocupação do solo, dados climatológicos (precipitação, temperaturas máximas e mínimas, umidade relativa do ar, velocidade do vento e insolação diária) e solos, além dos dados observados das variáveis que serão calibradas na modelagem, no caso dados fluviométricos. A metodologia utilizada para a organização e composição desses dados é descrita nos itens a seguir.

4.1.1 Localização Geográfica

. A Bacia Hidrográfica do Lago Descoberto (BHL D) está contida na área de Proteção Ambiental da bacia do Lago Descoberto (APA do Descoberto). A Figura 4.2 apresenta a localização em relação ao Distrito Federal.

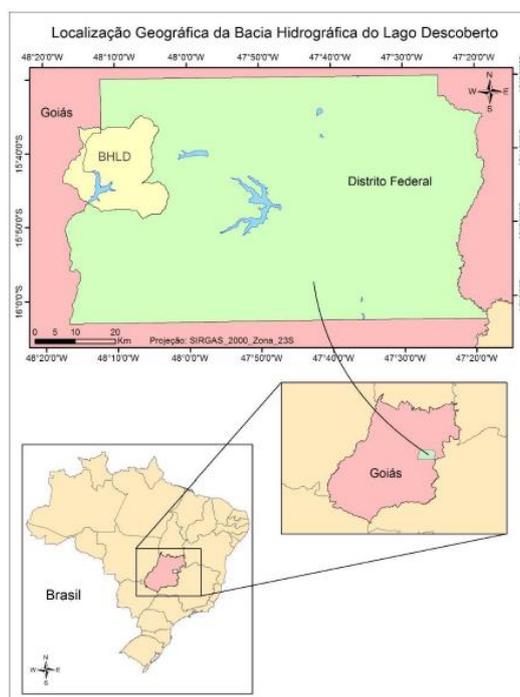


Figura 4.2 - Localização da bacia hidrográfica do lago Descoberto (FERRIGO, 2014).

As sub-bacias da BHL que fazem parte do estudo são: Sub-bacia do Rio Descoberto (SBRD), Sub-bacia do Córrego Chapadinha (SBCC), Sub-bacia do Córrego Olaria (SBCO), Sub-bacia do Ribeirão Rodeador (SBRR), Sub-bacia do Córrego Capão Comprido (SBCCC) e Sub-bacia do Ribeirão das Pedras (SBRP). A Figura 4.3 apresenta a localização das sub-bacias em relação ao lago Descoberto.

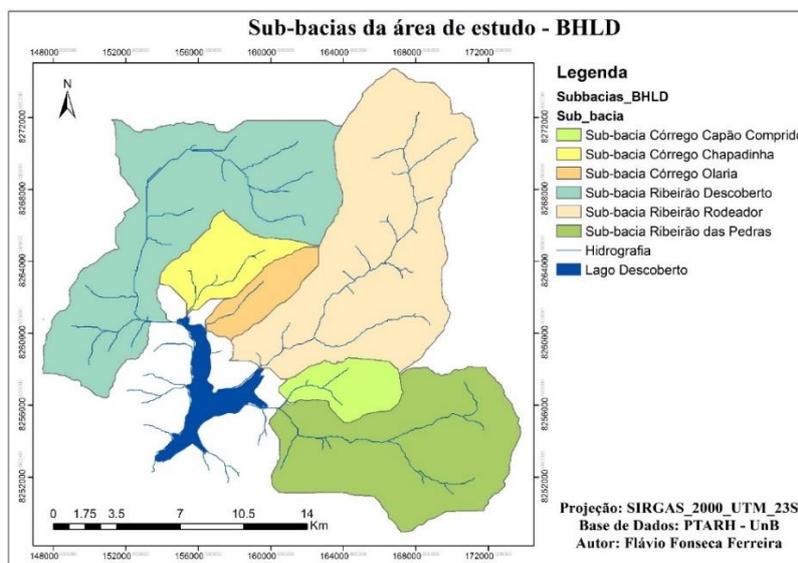


Figura 4.3 - Localização das sub-bacias de estudo na bacia hidrográfica do lago Descoberto.

4.1.2 Modelo Digital de Elevação (MDE)

O modelo digital de elevação (MDE) foi utilizado com o objetivo de promover uma representação do relevo da BHL, dessa forma é possível calcular as declividades estabelecer a convergência do escoamento superficial e o mapeamento da rede de drenagem.

O modelo digital de elevação foi gerado por Ferrigo (2014) a partir de curvas de nível espaçadas em 5 metros disponibilizadas pela TERRACAP (2009) e se encontra disponível na base de dados do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH). A Figura 4.4 apresenta o mapa do MDE utilizado na área de estudo.

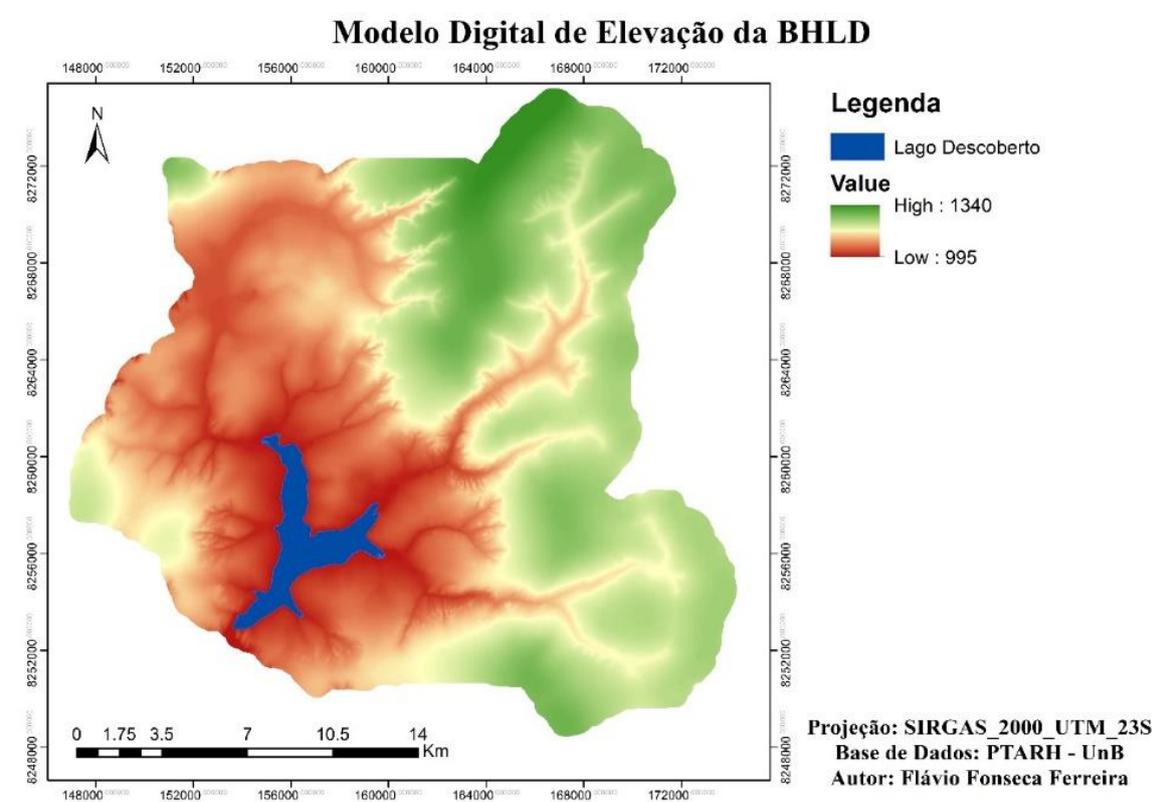


Figura 4.4 - Modelo Digital de Elevação das Bacia hidrográfica do Lago Descoberto.

4.1.3 Uso e ocupação do solo

Ferrigo (2014) elaborou o mapa de uso do solo manualmente na escala de 1:3000 por meio do software de geoprocessamento ArcGIS 10.1 (Figura 4.5). A confecção dos polígonos foi feita sobre a Ortofoto de abril de 2013, de resolução espacial de 24 cm e disponibilizada pela Terracap. O arquivo encontra-se disponível no Programa de Pós-Graduação em

Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH), a partir de sua aquisição, foi atualizada utilizando como base imagens aéreas de fevereiro de 2019, disponíveis na plataforma Google Maps e capturadas pelo satélite Landsat 8.

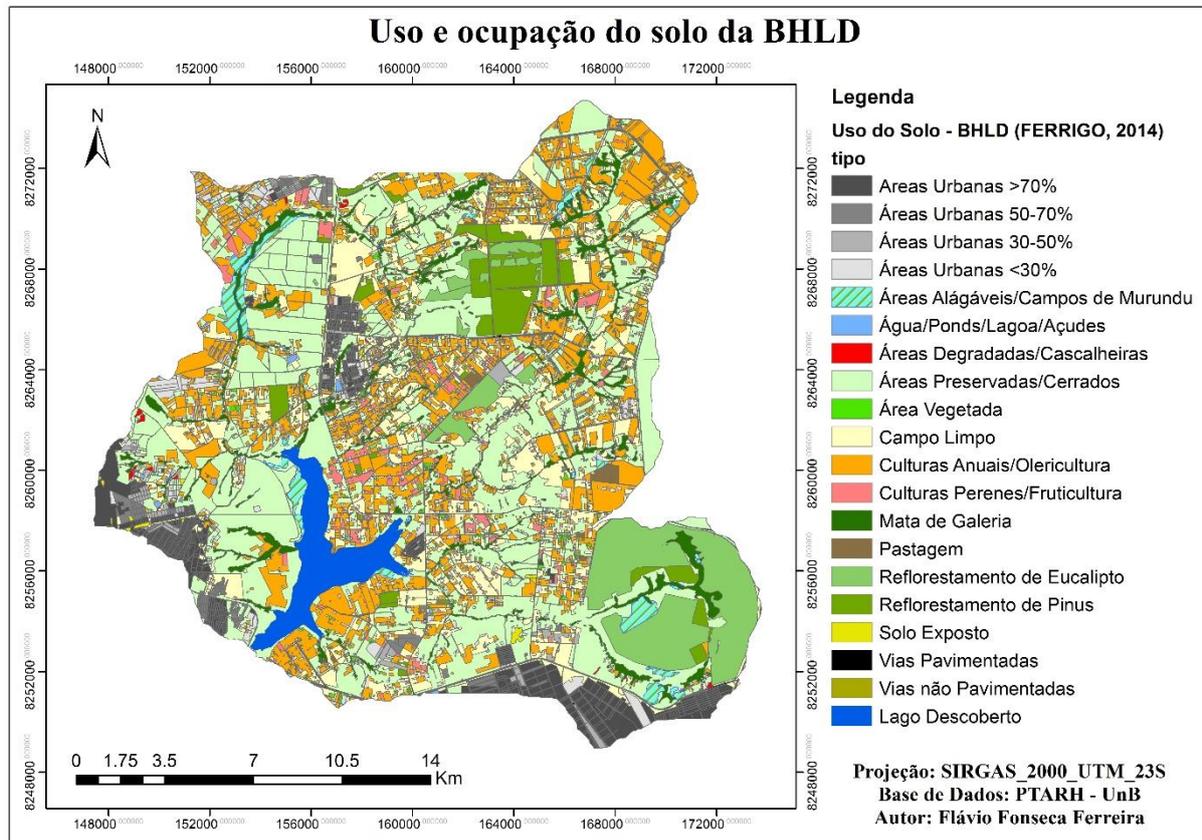


Figura 4.5 – Mapa de uso e ocupação do solo da BHL D (FERRIGO, 2014).

4.1.4 Pedologia

Os solos que predominam na bacia hidrográfica do lago Descoberto, e que correspondem a 71% da área da bacia, são o LATOSSOLO VERMELHO (LV) (34,09%) e o LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO (LVA) (36,58%), são solos bem estruturados e com boa drenagem, mas quando desnudos são suscetíveis à erosão (EMBRAPA, 2006).

Aproximadamente 14% da área é representada por CAMBISSOLO (C), que ocupa as porções mais elevadas da paisagem, associadas a terrenos com superfície de maiores declividades. O GLEISSOLO HÁPLICO (GX), que constitui 3,38% da bacia, caracteriza-se por ser um solo hidromórfico e ocupa, geralmente, as depressões da paisagem sujeitas à inundação. A bacia ainda apresenta 1,58% de GLEISSOLO MELÂNICO, 1,11% de

PLINTOSSOLO, 0,5% de NEOSSOLO FLÚVICO, 0,24% NITOSSOLO HÁPLICO, 0,17% de NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (FERRIGO, 2014).

O mapa de uso do solo foi elaborado a partir da base de dados do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH), proveniente originalmente de estudos da Embrapa Cerrados, que em 2003 desenvolveu o levantamento de reconhecimento de solos de alta intensidade do alto curso do rio Descoberto, DF/GO em escala 1:50.000 (Reatto *et al.*, 2003). A partir da delimitação das sub-bacias foi possível estimar o percentual de tipo de solo presente em cada (Tabela 4.1)

Tabela 4.1 - Tipos de solos presente nas sub-bacias do lago Descoberto.

Sub-bacias	Tipos de Solo						
	LV	LVA	CX	NX	RQ	FX	GX
SBCC	49,9%	23,8%	24,5%	-	-	1,3%	0,4%
SBCCC	65,6%	11,5%	20,2%	-	-		2,7%
SBCO	37,9%	41,5%	11,4%	0,7%		5,8%	3,4%
SBRD	36,4%	48,4%	8%	-	0,8%	-	6,4%
SBRP	51,9%	28,5%	7,4%	-	-	-	12,2%
SBRR	40,8%	34,3%	19,5%	-	1,8%	3,3%	0,4%

O mapa de solo das sub-bacias de estudo é apresentado na Figura 4.6.

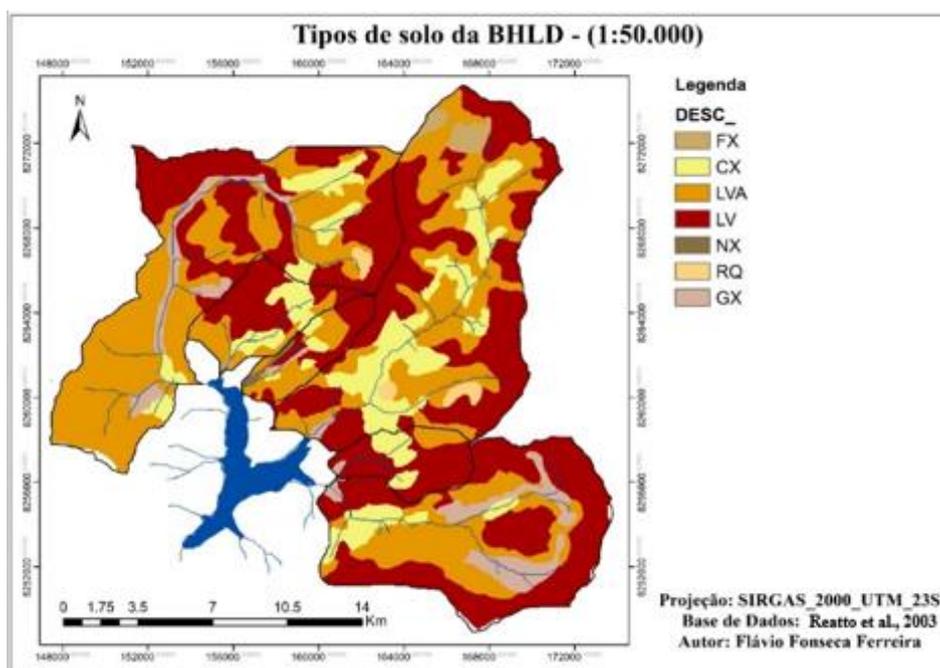


Figura 4.6 - Tipos de solos presente na bacia do lago Descoberto.

4.1.5 Clima

Oscila entre 1200 a 1800 mm a precipitação anual na Bacia do Lago Descoberto. A estação seca é bastante rigorosa e se estende aproximadamente de maio a setembro. A estação chuvosa vai de outubro a abril e apresenta maior pluviosidade no verão - dezembro a março - quando se concentram mais de 80% do total anual de chuvas. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é tropical de altitude do tipo Cwa (FERRIGO, 2014).

4.1.5.1 Estações pluviométricas

No estudo, obteve-se e utilizou-se dados provenientes de seis estações pluviométricas presentes na área da BHL D, consideradas fundamentais devido a localização das mesmas na bacia hidrográfica e operadas pela Companhia de Saneamento do Distrito Federal (CAESB). A Tabela 4.2 expõe as informações básicas de localização das estações e altitude. A disposição das estações é apresentada na Figura 4.7.

Tabela 4.2 - Informações básicas sobre as estações pluviométricas.

Código	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1548007	ETA Brazlândia	15° 41' 3"	48° 12' 27"	1098
1548000	Brazlândia Quadra 18	15° 40' 16"	48° 13' 19"	1106
1548008	Descoberto	15° 46' 49"	48° 13' 49"	1061
1548006	Taguatinga ETA RD	15° 47' 23"	48° 06' 46"	1269
1548009	Jatobazinho	15° 42' 43"	48° 5' 33"	1205
1548013	Fazenda Santa Elisa	15° 35' 48"	48° 2' 35"	1205

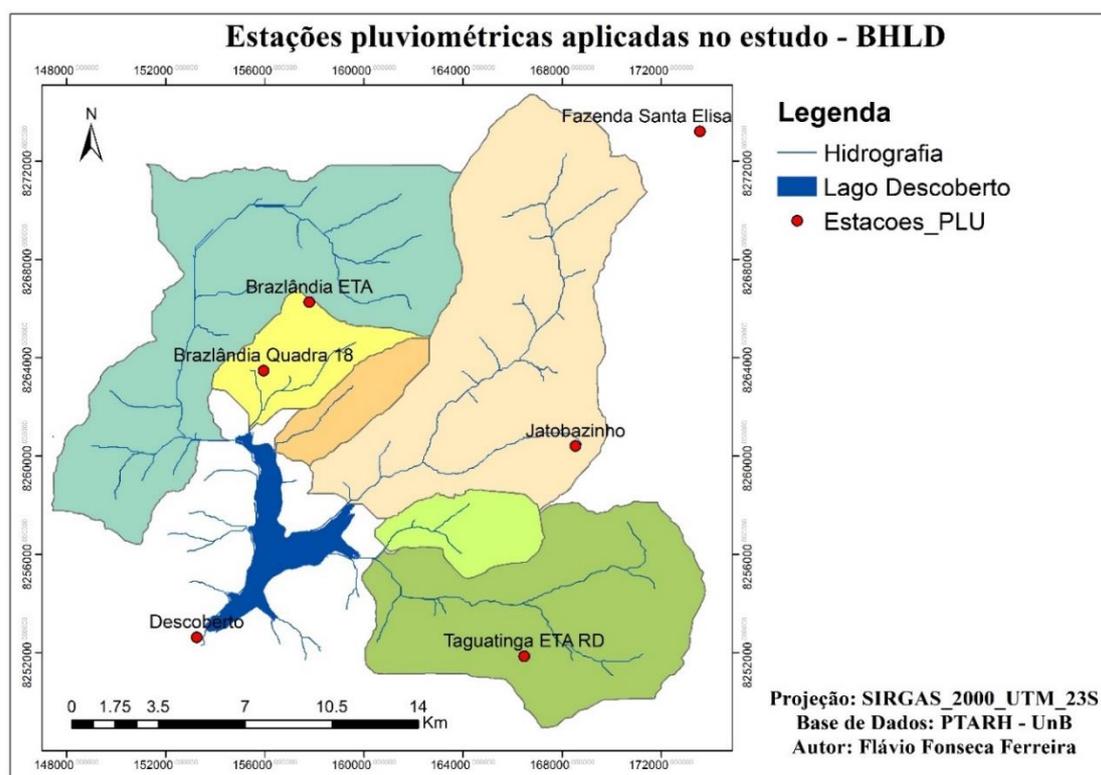


Figura 4.7 - Disposição das estações pluviométricas aplicadas na modelagem das sub-bacias.

A disponibilidade dos dados de precipitação varia no tempo de acordo com a estação, atualmente apenas 3 estações ainda estão em operação, sendo elas Descoberto, ETA Brazlândia e Taguatinga ETA RD. A estação Fazenda Santa Elisa encerrou sua operação no dia 01/03/2009, a estação Jatobazinho no dia 01/04/2009 e a estação Brazlândia Quadra 18 no dia 24/03/2014.

De acordo com a área de influência e a proximidade das estações em cada sub-bacia, empregou-se as respectivas estações pluviométricas no modelo SWAT para cada sua-bacia, como apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Estações pluviométricas aplicadas no SWAT para cada sub-bacia em estudo.

Estação	SBRD	SBCC	SBCO	SBRR	SBCCC	SBRP
ETA Brazlândia	X	X	X	X		
Brazlândia Quadra 18	X	X	X	X		
Descoberto	X					
Taguatinga ETA RD					X	X
Jatobazinho				X	X	X
Fazenda Santa Elisa				X		

4.1.5.2 Estações fluviométricas

Os dados de vazão para a calibração e verificação do modelo são de responsabilidade da CAESB, e foram obtidas a partir do portal HydroWeb, que oferece o acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), reunindo dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos.

Todas as sub-bacias em estudo possuem estações fluviométricas de monitoramento diário próxima ao seu exutório e adotadas para calibração e verificação do modelo, apesar da simulação ser em nível mensal, foram utilizadas com o objetivo de diminuir os erros. A disposição dos postos fluviométricos de medição diária nas sub-bacias estudadas é apresentada na Figura 4.8.

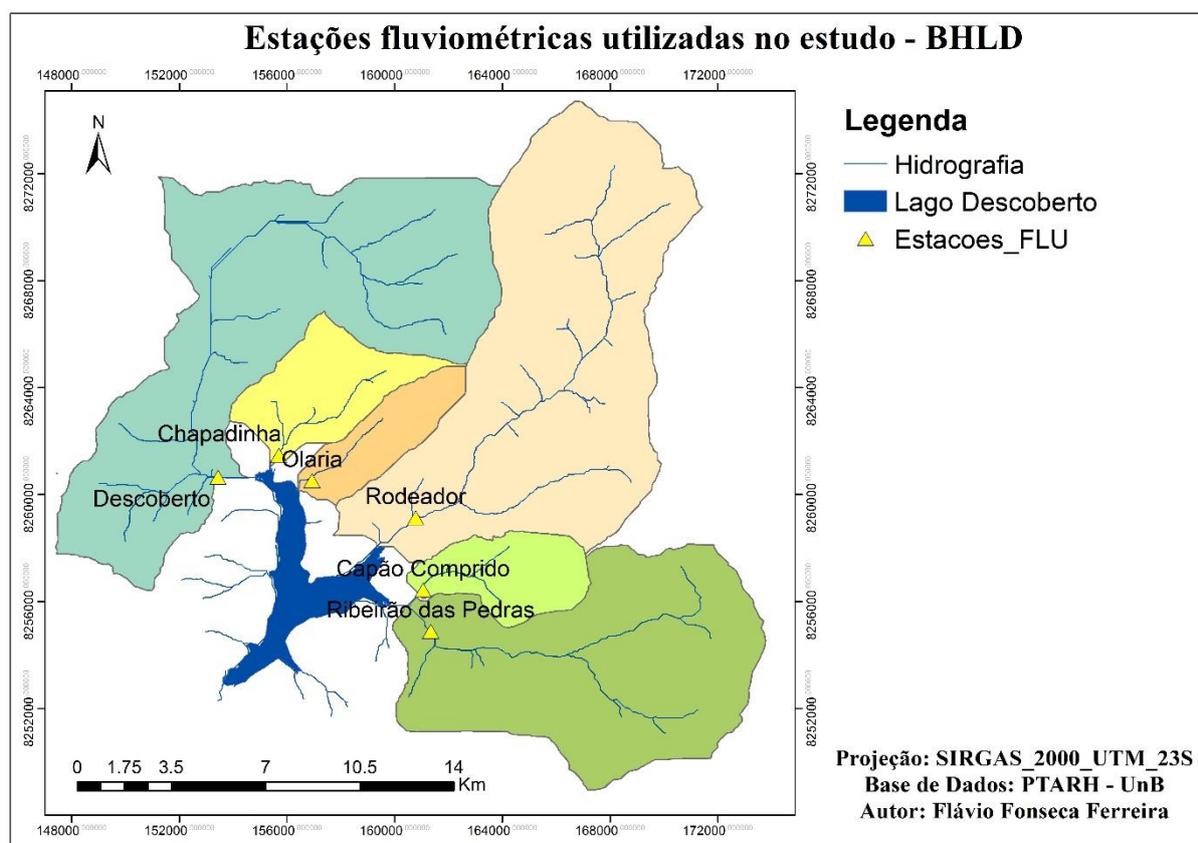


Figura 4.8 - Disposição das estações fluviométricas aplicadas na modelagem das sub-bacias.

A Tabela 4.4 a seguir apresenta a aquisição e organização dos dados de entrada necessários para suprir o modelo, a fim de atender a realidade das sub-bacias em estudo e contribuindo para que a modelagem possa ser realizada de forma consistente.

Tabela 4.4 - Síntese dos dados, fonte e período.

DADOS	FONTE	PERÍODO E DETALHES
Climáticos	INMET	1997 - 2017
Modelo Digital de Elevação	PTARH (Ferrigo, 2014)	Curvas de nível 5 m (TERRACAP)
Mapa de Uso e Ocupação	PTARH (Ferrigo, 2014)	Escala 1:3000
Mapa de Tipos de Solo	EMBRAPA	Escala 1:50.000
Pluviométricos	CAESB/ANA	1997 - 2017
Fluviométricos	CAESB	1997 - 2017

4.2 Modelagem das Sub-Bacias

4.2.1 Modelagem Preliminar

Inicialmente os dados necessários foram organizados para que o programa fosse executado, conforme apresentado no item 4.1. O processo de simulação ocorreu a fim de se analisar os processos do ciclo hidrológico, baseados na variável de vazão.

A modelagem no SWAT é realizada numa ordem dividida em três etapas: 1) Delimitação da bacia hidrográfica; 2) Definição das unidades de resposta hidrológica (HRUs); 3) Inserção dos dados climáticos e edição dos dados de entrada em conjunto com a execução do processo de simulação. Esses passos são executados na própria interface do QSWAT.

Na primeira etapa utilizou-se um Modelo Digital de Elevação (MDE), essencial para a geração da base cartográfica, tais como a delimitação da bacia e sua discretização em sub-bacias, definição do fluxo de drenagem e da rede de drenagem, geração do mapa de declividade e identificação do exutório.

Na segunda etapa são definidas as Unidades de Respostas Hidrológicas (HRUs) em cada uma das sub-bacias. As HRUs foram geradas a partir da sobreposição dos mapas de declividade, tipos de solo e uso e cobertura do solo. A HRU representa a composição desse conjunto de bases cartográficas discretizando a bacia em diversas microrregiões singulares que possuem declividade, tipo de solo e uso do solo em comum, permitindo espacializar as cargas

geradas nessas unidades básicas de representação de acordo com os demais processos hidrológicos presente na bacia.

A terceira etapa foi realizado a inserção de dados climáticos, tais como precipitação diária, temperaturas máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, dados esses que podem ser simulados pelo programa ou carregados de estações meteorológicas e pluviométricas.

As informações presentes em cada uma das HRUs geradas têm como vantagem o aumento da precisão dos dados obtidos na simulação, possibilitando um maior conhecimento acerca dos processos hidrológicos da bacia. No presente trabalho, o aspecto quantitativo de vazão foi considerado a variável de maior relevância e consequentemente parâmetros que estão relacionados com esse processo são de grande importância.

A análise e aquisição de informações quantitativas é tratada no contexto atual como de grande interesse para o gerenciamento ambiental da bacia em estudo, visto que uma crise hídrica sem precedentes ocorreu há poucos anos, no qual os afluentes da bacia do Lago Descoberto são essenciais na manutenção do nível d'água do principal reservatório de abastecimento do Distrito Federal.

A simulação com o modelo foi executada entre os períodos de janeiro de 1997 a dezembro de 2017, utilizando os três primeiros anos para aquecimento, como forma de diminuir os possíveis erros no início o processo.

4.2.2 Seleção de Parâmetros e análise da sensibilidade

Após a modelagem inicial, foi realizada a etapa de calibração de dados para vazão por meio da ferramenta SWAT-CUP utilizando o algoritmo Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2).

O primeiro passo do processo de calibração e validação no SWAT é a determinação dos parâmetros mais sensíveis para a bacia hidrográfica, ou seja, a análise da sensibilidade dos parâmetros físicos que representam o processo de escoamento superficial e fluxo de base presente na bacia hidrográfica e que estão relacionados a vazão (Arnold *et al.*, 2012). A análise de sensibilidade é realizada com diversos parâmetros que o SWAT utiliza para os cálculos de estimativa de vazão diretamente ou indiretamente, permitindo identificar quais parâmetros influenciam significativamente na dinâmica hidrológica, além de que a hierarquização dos parâmetros sensíveis pôde auxiliar em um melhor entendimento do processo em estudo, e uma

melhor estimativa dos seus valores levou a uma melhor e mais rápida aproximação dos dados simulados aos dados medidos (Ferrigo, 2014).

A escolha dos parâmetros foi executada com base em estudos e experiências anteriores na bacia, que fundamentaram o conhecimento do comportamento hidrológico e da modelagem na área de estudo. Os parâmetros selecionados para calibração automática da vazão no algoritmo SUFI-2 foram os mesmos utilizados por Ferrigo (2014), que obteve resultados satisfatórios utilizando esse algoritmo na bacia do Descoberto. A Tabela 4.5 abaixo apresenta um resumo dos parâmetros e informações.

Tabela 4.5 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da vazão (Ferrigo, 2014).

Parâmetro	Descrição	Unidade	Intervalo de variação	
			Min	Máx
CN2	Curva número na condição II: Esse parâmetro é importante no cálculo do escoamento superficial quando utilizado o método <i>SCS Curve Number</i> para seu cálculo. O CN é um número adimensional e é obtido em função da permeabilidade, do tipo de solo, do uso e da condição antecedente de umidade no solo. Ou seja, os valores de deflúvio na bacia são proporcionais ao parâmetro CN.	adim	0	100
ALPHA_BF	Constante de recessão do fluxo de base: Esse parâmetro é um indicador direto da resposta do fluxo subterrâneo para as mudanças na recarga. Quanto maior o valor desse parâmetro maior será a recarga do aquífero e menor o fluxo de base. Os valores variam 0,1 - 0,3 para solos com a resposta lenta para recarga e 0,9 - 1,0 para solos com uma resposta rápida.	adim	0	1
GW_DELAY	Intervalo de tempo para a recarga do aquífero: Esse parâmetro é importante no cálculo da recarga do aquífero e é dependente da formação geológica. O GW_DELAY é inversamente proporcional a recarga.	dias	0	50

GWQMN	Profundidade limite de água no aquífero raso necessária para o fluxo de retorno ocorrer: Quanto maior o valor desse parâmetro uma porção maior do fluxo de base é retardada. Ou seja, para valores baixos desse parâmetro é produzido mais fluxo de base e um alto fluxo fluvial. O fluxo das águas subterrâneas para o canal é permitido somente se a profundidade da água no aquífero raso for igual ou maior do que o GWQMN.	mm	0	5000
GW_REVAP	Coeficiente de ascensão da água à zona não saturada: esse parâmetro é designado como uma constante de proporcionalidade para o cálculo da quantidade máxima de água que se move no solo em resposta às deficiências de água.	adim	0,02	0,2
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo: É um parâmetro importante no processo de evapotranspiração. Os valores desse parâmetro representam um percentual aplicado à evaporação da camada superior do solo, de modo que percentuais elevados significam maior evaporação na camada superior do solo.	adm	0	1
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo: Esse parâmetro é importante no processo de movimentação da água no solo e é utilizado para calcular o conteúdo de água no solo disponível para a vegetação. É dado pela diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha.	adim	0	1
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo: É um parâmetro influente no processo de movimentação da água no solo e é necessário para calcular o tempo de percolação da água numa dada camada do solo. O fluxo de base aumenta quando esse parâmetro está entre valores baixo e médio e diminui	mm/h	0	100

	quando o parâmetro está entre médio e alto.			
SOL_BD	Densidade aparente do solo: A densidade do solo expressa a relação entre a massa das partículas sólidas e o volume total do solo, $\rho_b = MS / VT$. A densidade do solo é inversamente relacionada a porosidade do mesmo solo, ou seja, maior porosidade quanto menor o valor da densidade do solo.	mg/m ³ ou g/cm ³	0,9	2,5
SHALLST	Profundidade inicial do aquífero raso	mm	0	1000
GWHT	Altura inicial da água subterrânea	m	0	25
DEEPST	Profundidade inicial de água no aquífero profundo	mm	0	3000
REVAPMN	Profundidade limite da água no solo para a ocorrência da ascensão da água à zona não saturada: É um parâmetro importante no processo de contribuição de água subterrânea e define o limite do nível de água no aquífero raso para que o movimento da água dentro do solo ocorra em resposta as deficiências de água. É utilizado no cálculo da estimativa da quantidade máxima de água que será removida do aquífero num dado dia. Ou seja, o movimento da água do aquífero raso para a zona insaturada é permitido somente se o volume de água no aquífero raso for igual ou maior do que o REVAPMN.	mm	0	500
ANION_EXCL	Fração de porosidade (espaços vazios).	adim	0,01	1,00

*adim: adimensional

Após a seleção dos parâmetros a serem utilizados, esses foram inseridos no SWAT-CUP com os valores padrão de intervalos de variação sugeridos pelo manual do SWAT e foram rodadas 700 iterações para cada sub-bacia a fim de avaliar a sensibilidade global.

O SWAT-CUP apresenta dois resultados em relação à análise de sensibilidade global: (1) o *t-stat*, que fornece a medida da sensibilidade, em que quanto maior for o seu valor absoluto mais sensível é o parâmetro; e (2) o *p-value* que determina a significância da sensibilidade, e um valor

próximo à zero indica maior significância (Ferrigo, 2014). As duas respostas foram apreciadas a fim de análise.

Ao contrário do que era feito em antigas versões do SWAT, nas quais havia um módulo específico para a análise de sensibilidade e esta era feita previamente à calibração, o SWAT-CUP 2012 realiza a análise de sensibilidade concomitantemente à calibração, ou seja, permitindo delimitar previamente os respectivos intervalos dos parâmetros selecionados de acordo com as características físicas da bacia em estudo, reduzindo conseqüentemente o tempo de processamento.

4.2.3 Calibração e Verificação

A calibração da vazão também foi realizada automaticamente pelo uso da ferramenta SWAT-CUP 2012 com o uso do algoritmo SUFI-2.

A partir do resultado da análise de sensibilidade, caso o modelo atingisse um valor adequado na função objetivo aplicada, não seria necessário novas iterações, caso não, prosseguiria para novas iterações com ajuste dos intervalos dos parâmetros. Nessa etapa, foi realizada a iteração com 700 simulações com dados ainda de 2000 a 2010.

Para a avaliação do desempenho de modelos hidrológicos de bacia, Moriasi *et al.* (2007) sugerem que as variáveis estatísticas utilizadas sejam o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) - equação 4.1. Nessa equação Y_{obs} é a variável observada, Y_{sim} é o valor simulado, $\overline{Y_{obs}}$ é a média dos valores observados, $\overline{Y_{sim}}$ é a média dos valores simulados e n a quantidade de dados na série de vazões observadas

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs} - Y_i \text{ sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs} - \overline{Y_{obs}})^2} \right] \quad (\text{Equação 4.1: coeficiente de Nash- Sutcliffe})$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n [(Y_i \text{ obs} - \overline{Y_{obs}})(Y_i \text{ sim} - \overline{Y_{sim}})]^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs} - \overline{Y_{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i \text{ sim} - \overline{Y_{sim}})^2} \right] \quad (\text{Equação 4.2: coeficiente de Determinação})$$

O coeficiente de determinação (equação 4.2) mostra o grau de colinearidade entre os valores observados e simulados, descrevendo a proporção da variância entre esses valores. O R^2 varia entre 0 e 1, em que valores mais próximos a 1 indicam menor variância do erro.

O índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) varia entre $-\infty$ a 1, sendo que valores menores do que zero indicam que a média dos dados observados prevê melhor do que a simulação pelo modelo, enquanto valores próximos a um indicam um ajuste ótimo. Segundo Moriasi *et al.* (2007), valores entre 0 e 1 são geralmente vistos como níveis aceitáveis de performance do modelo, enquanto que valores menores que 0 indicam um desempenho inaceitável do modelo.

Em relação às análises estatísticas do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), Green e Griesven (2008) consideram que, para uma calibração com dados diários, valores de NSE superiores a 0,4. Segundo Moriasi *et al.* (2007), para a calibração mensal, valores de NSE acima de 0,5 são considerados satisfatórios, acima de 0,65 bons, e superiores a 0,75 muito bons.

A partir do resultado da análise de sensibilidade, selecionaram-se cinco parâmetros identificados como mais sensíveis. Nessa etapa, foi realizada a iteração com 1000 simulações com dados ainda de 2000 a 2010, tendo como função objetivo o NSE, com passo mensal.

A calibração automática do modelo SWAT foi realizada para as seis sub-bacias monitoradas, no período do ano 2000 a 2010.

A verificação foi realizada para as sub-bacias no período de 2011 a 2017 e foram avaliados os resultados em nível mensal.

4.2.4 Cenarização e análise de resultados

No intuito de realizar a avaliação da influência do uso e ocupação do solo no balanço hídrico das sub-bacias hidrográficas em estudo, após a execução das etapas de análise de sensibilidade, calibração e verificação, o modelo foi aplicado na simulação de cenários, simulando três diferentes usos do solo: o primeiro na qual a bacia possuía sua vegetação totalmente preservada, denominado de cenário preservado; o segundo no período atual, que ocorreu para a etapa de calibração do modelo; e um último uso do solo antropizado, onde foi pressuposto que o ambiente estaria mais degradado pela expansão urbana e agrícola.

Realizou-se a comparação entre o comportamento do deflúvio e gráficos foram elaborados a fim de visualizar as diferenças presentes entre os cenários, no qual o período de dados utilizados e inseridos no modelo foram de janeiro de 2000 a dezembro de 2005.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados do estudo e a discussão de acordo com a literatura específica atual. Assim, são expostas a caracterização das sub-bacias e a avaliação das simulações geradas pela modelagem hidrológica e cenários produzidos.

5.1 Caracterização das Sub-bacias do Alto Descoberto

5.1.1 Relevo

O mapa de declividade das sub-bacias foi elaborado a partir do modelo digital de elevação (MDE) provenientes da base de dados do PTARH. De acordo com Uberti *et al.* (1991) segmentou-se o relevo em três classes de declividade: (1) de 0 a 8 %, incluindo as classes de relevo plano e suavemente ondulado; (2) de 8 a 20%, representando a classe de relevo ondulado; e (3) acima de 20%, reunindo as classes de relevo ondulado, fortemente ondulado, montanhoso e escarpado. O intervalo de valores de saída depende do tipo de unidade de mensuração, ou seja, para uma superfície plana com 0° de inclinação, equivale a 0%, e uma superfície de 45° corresponde a 100%. Esta classificação foi realizada por Ferrigo (2014) na bacia considerada neste estudo, e por Nunes (2016) na bacia hidrográfica do Lago Paranoá. As Figuras 5.1; 5.2; 5.3; 5.4; 5.5 e 5.6 apresentam o mapa de declividade e as classes de relevo das sub-bacias estudadas.

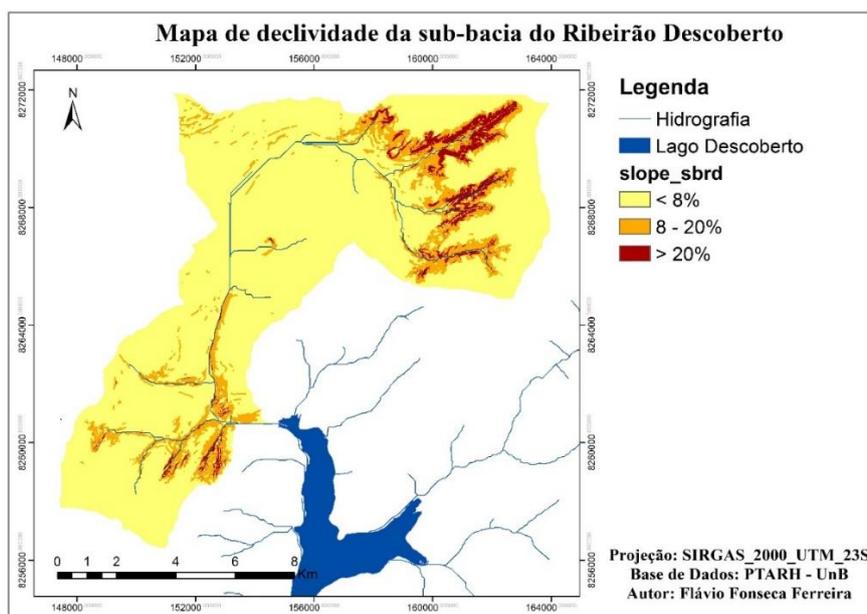


Figura 5.1 - Mapa de declividade da sub-bacia do rio Descoberto.

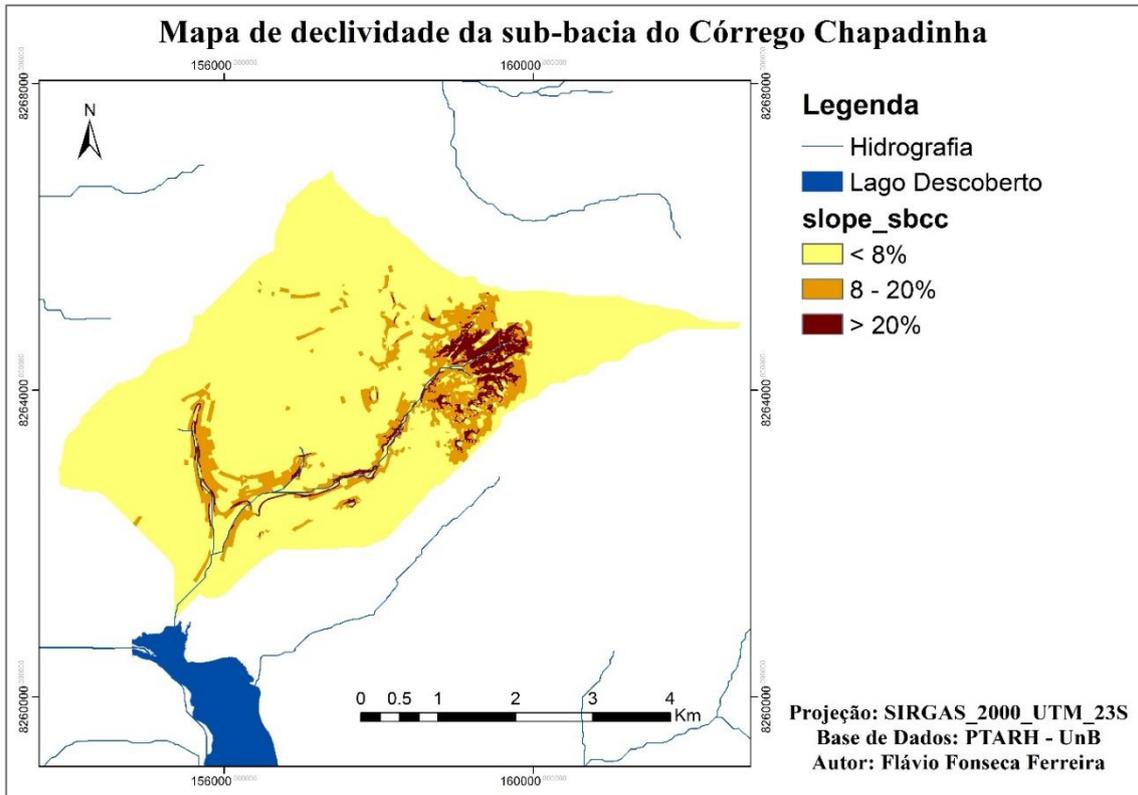


Figura 5.2 - Mapa de declividade da sub-bacia do córrego Chapadinha.

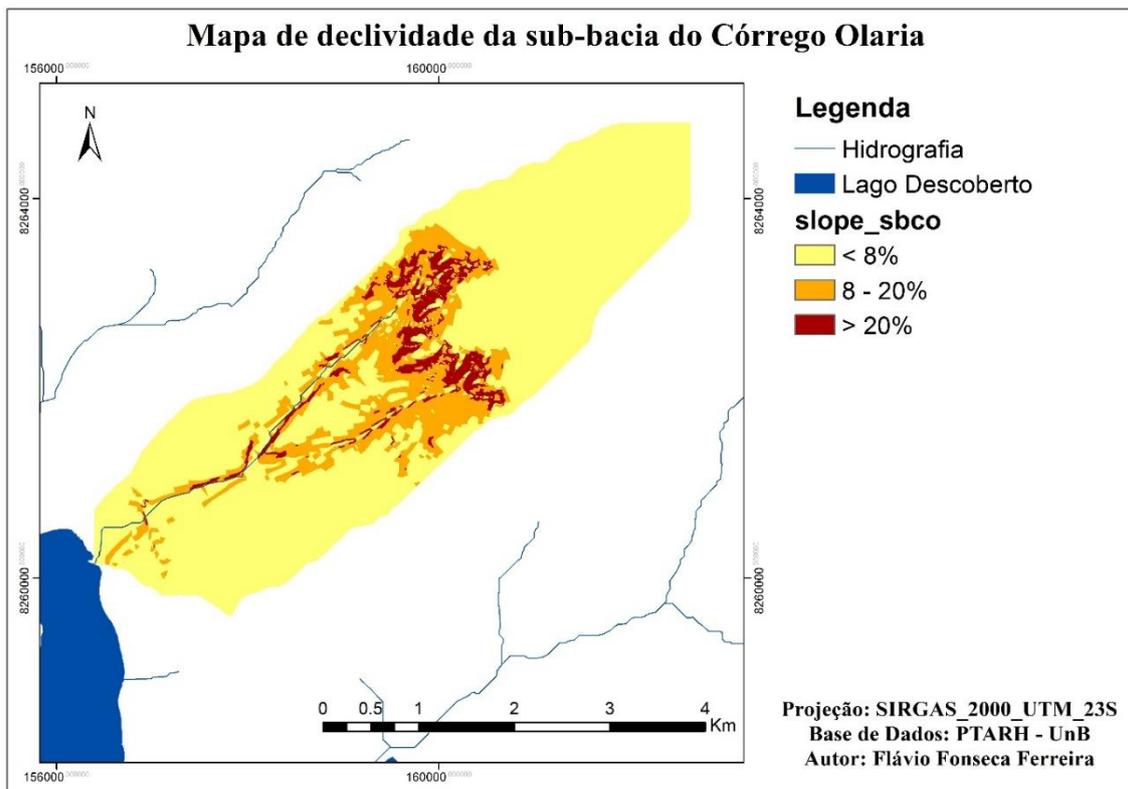


Figura 5.3 - Mapa de declividade da sub-bacia do córrego Olaria

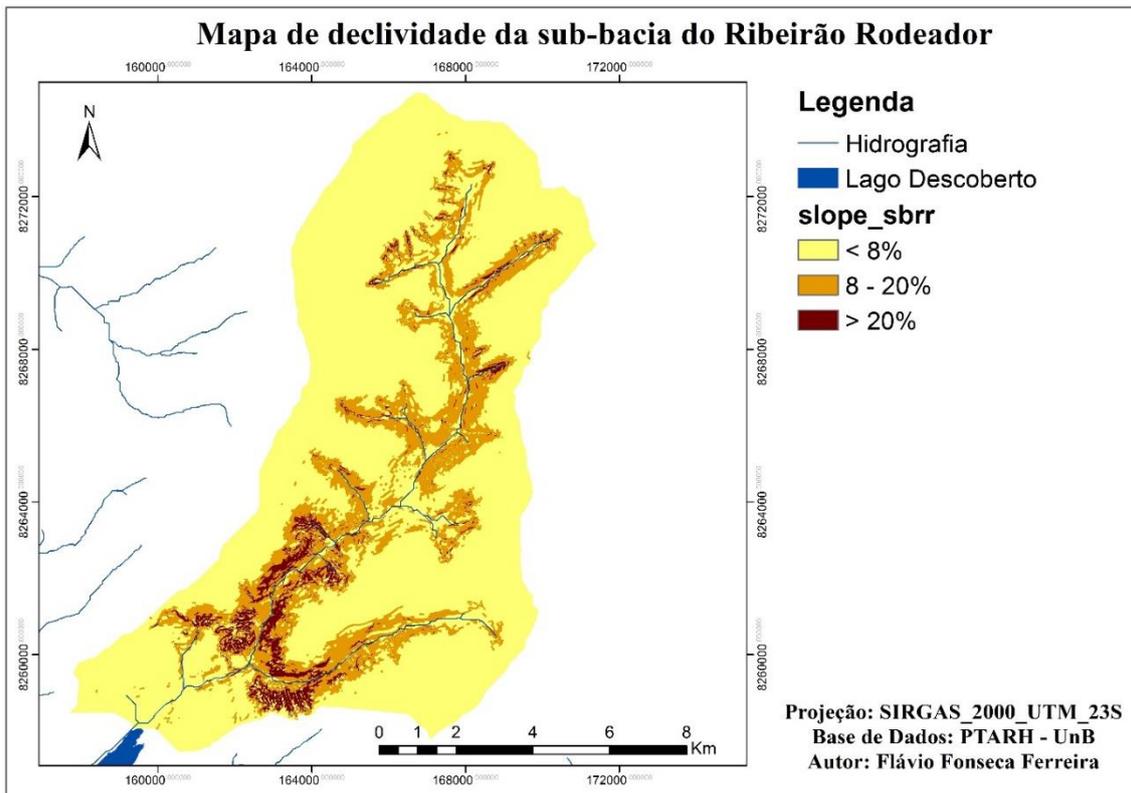


Figura 5.4 - Mapa de declividade da sub-bacia do ribeirão Rodeador

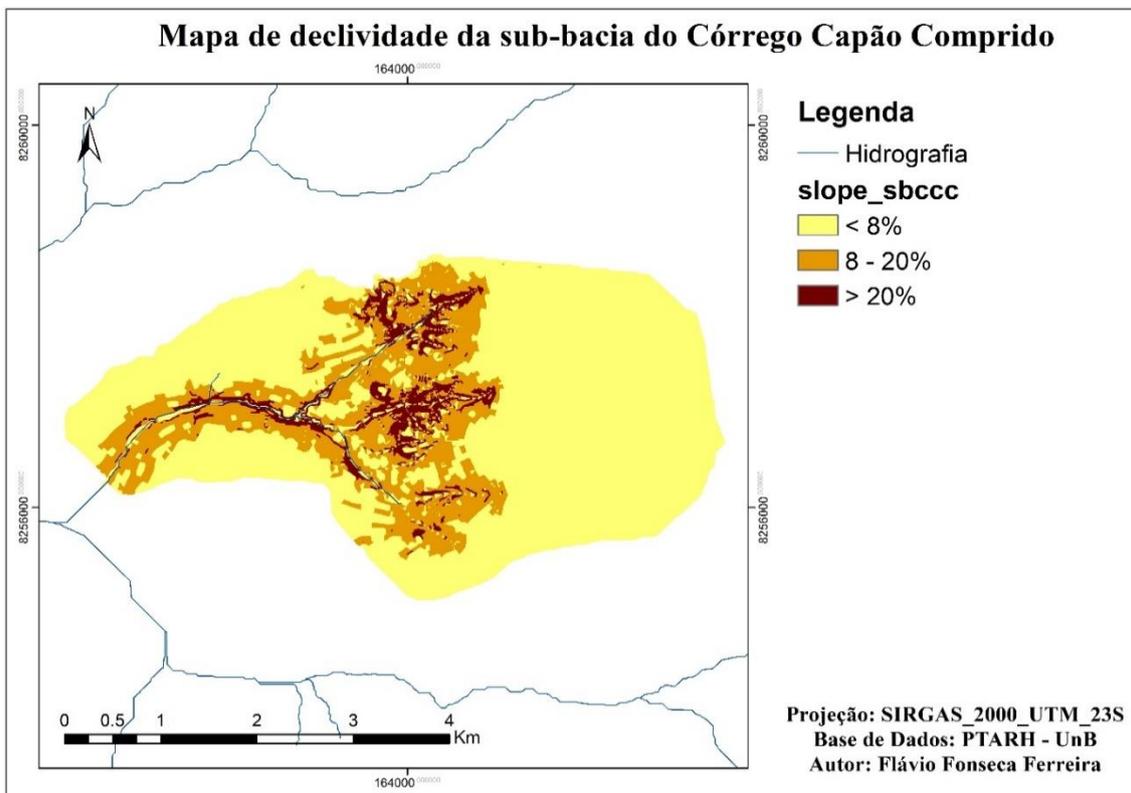


Figura 5.5 - Mapa de declividade da sub-bacia do córrego Capão Comprido.

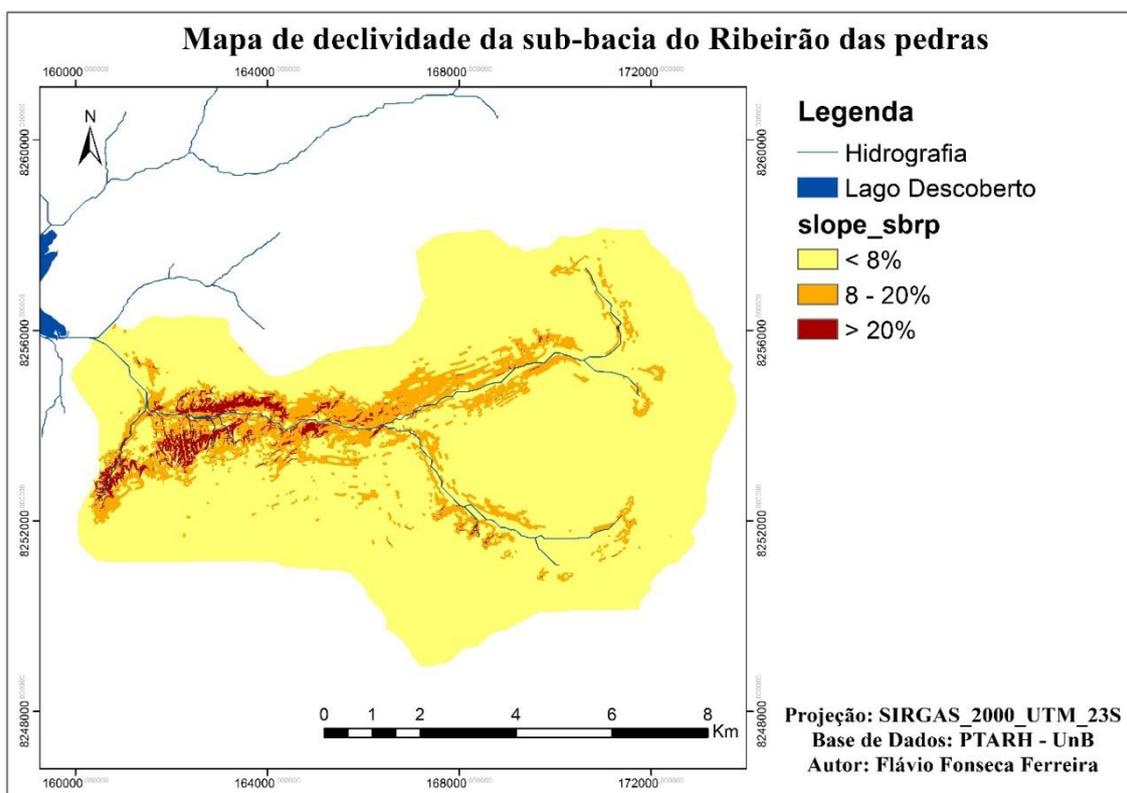


Figura 5.6 - Mapa de declividade da sub-bacia do ribeirão das Pedras.

A partir da classificação, obteve-se os seguintes dados percentuais de área e declividade presentes em cada sub-bacia de estudo (Tabela 5.1):

Tabela 5.1 - Classes de declividade e respectivas áreas e porcentagens em cada sub-bacia de estudo.

Sub-bacia	Declividade		
	Área < 8 %	Área entre 8 - 20 %	Área > 20 %
SBCC	85,30%	11,30 %	3,39 %
SBCCC	71,80 %	23,50 %	4,61 %
SBCO	77,57 %	17,17 %	5,26 %
SBRD	84,14 %	13,02 %	2,84 %
SBRP	85,44 %	9,92 %	2,23 %
SBRR	75,64 %	20,52 %	3,83 %

5.1.2 Uso e ocupação do solo

A partir da atualização do arquivo de uso do solo, a classificação da BHL D foi realizada em 18 classes. A fim de facilitar a observação dos usos para cada sub-bacia em estudo, elaborou-se as Figuras 5.7; 5.8; 5.9; 5.10; 5.11 e 5.12 que representam os mapas de uso e ocupação das sub-bacias.

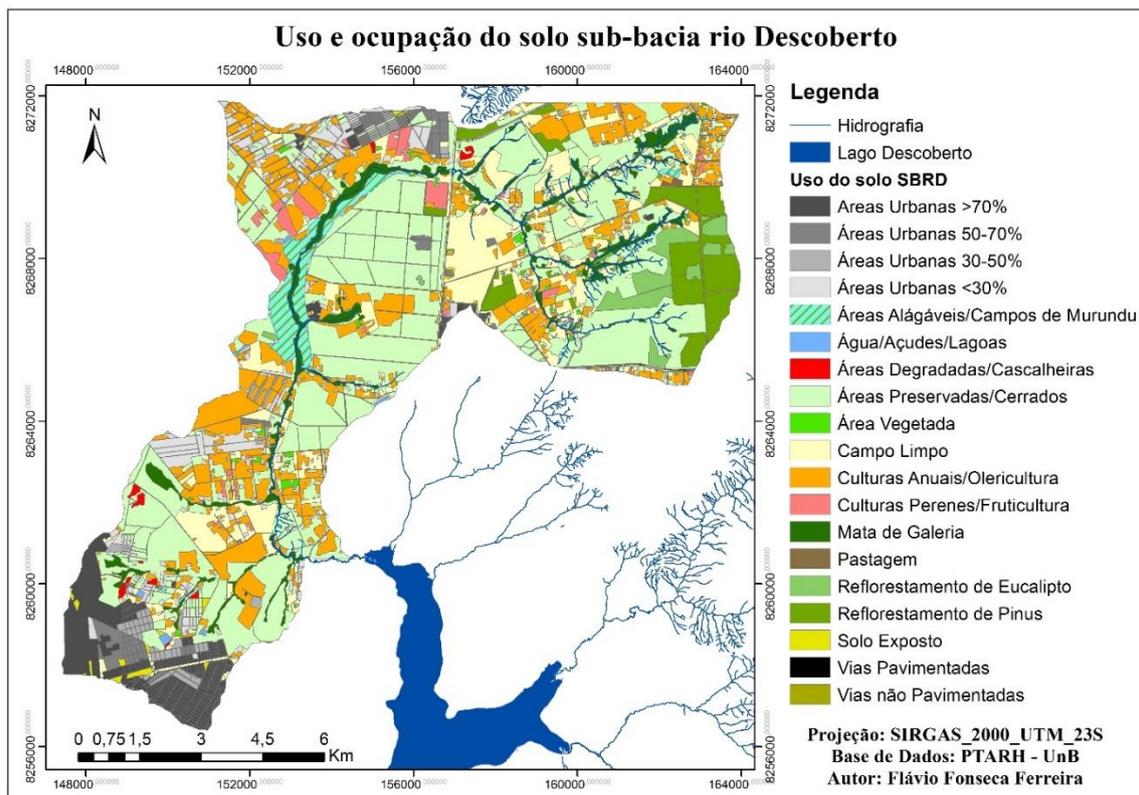


Figura 5.7 - Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do rio Descoberto.

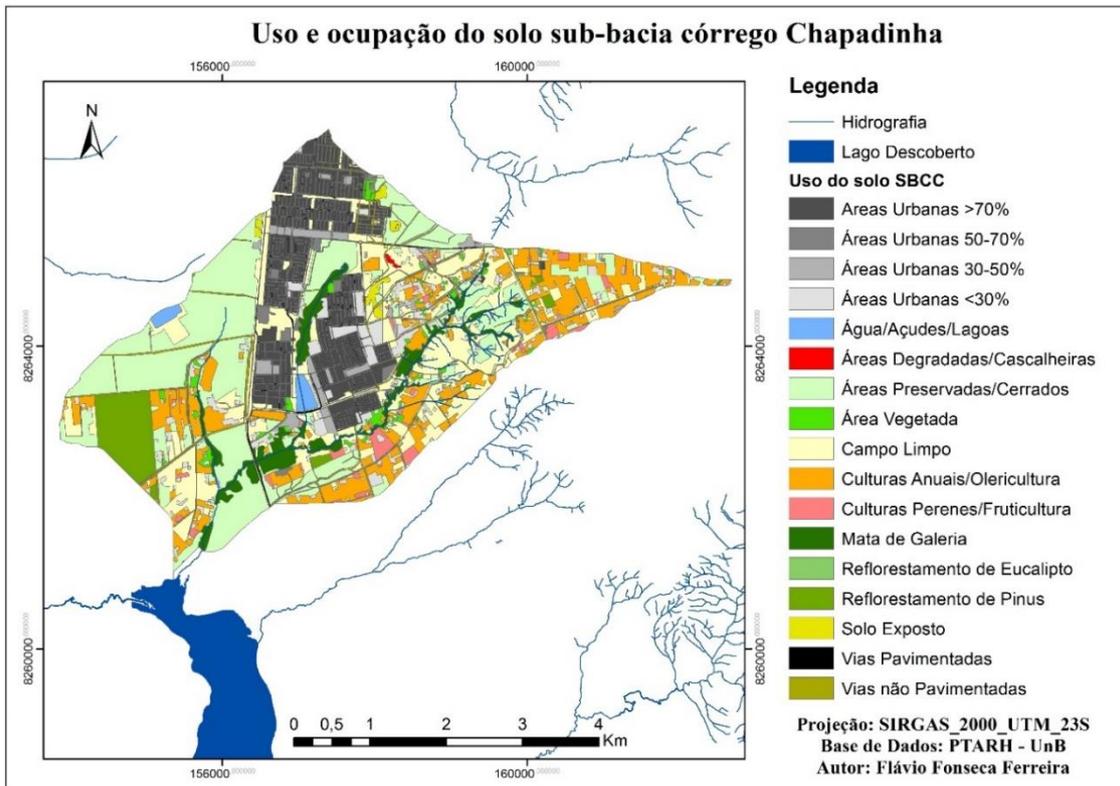


Figura 5.8 - Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do córrego Chapadinha.

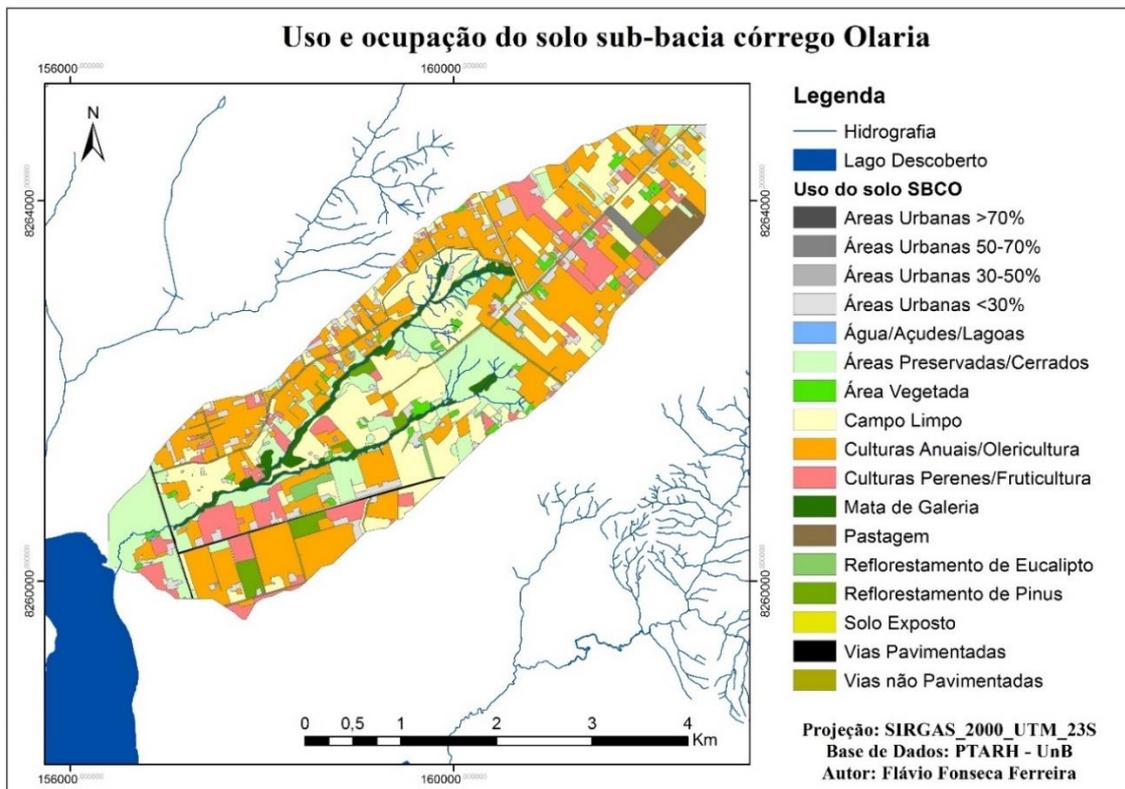


Figura 5.9 - Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do córrego Olaria.

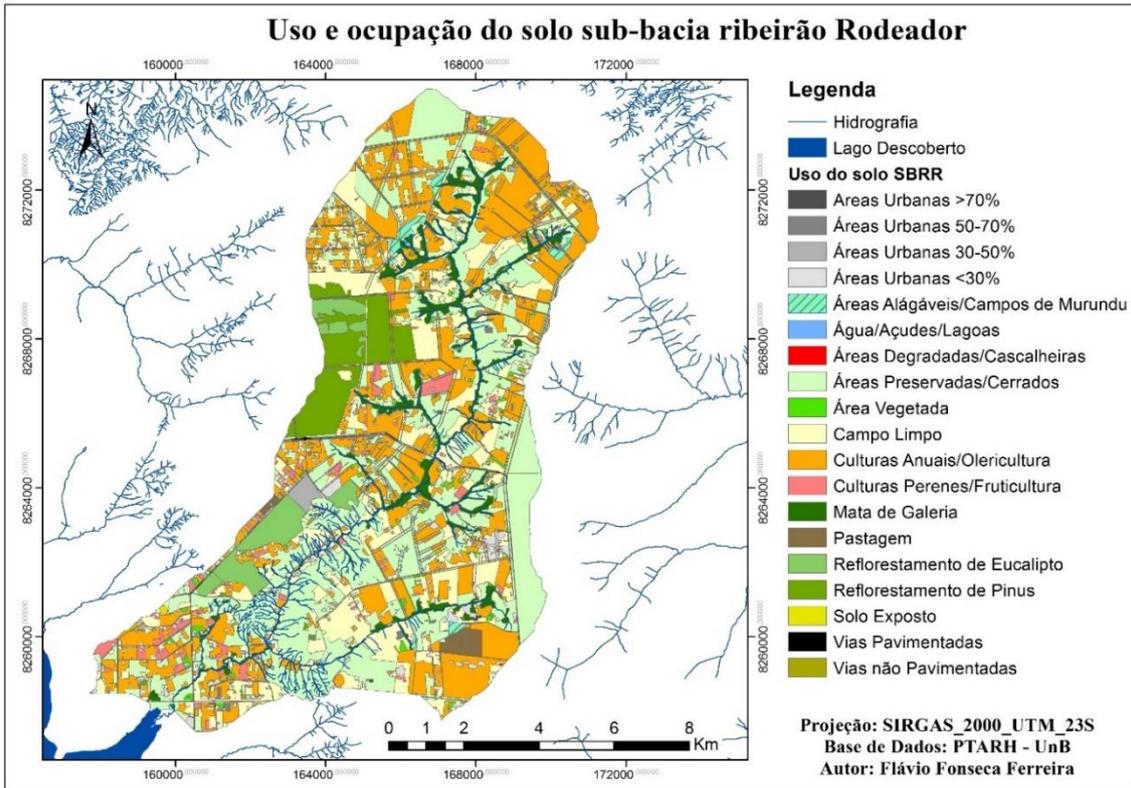


Figura 5.10 - Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do ribeirão Rodeador.

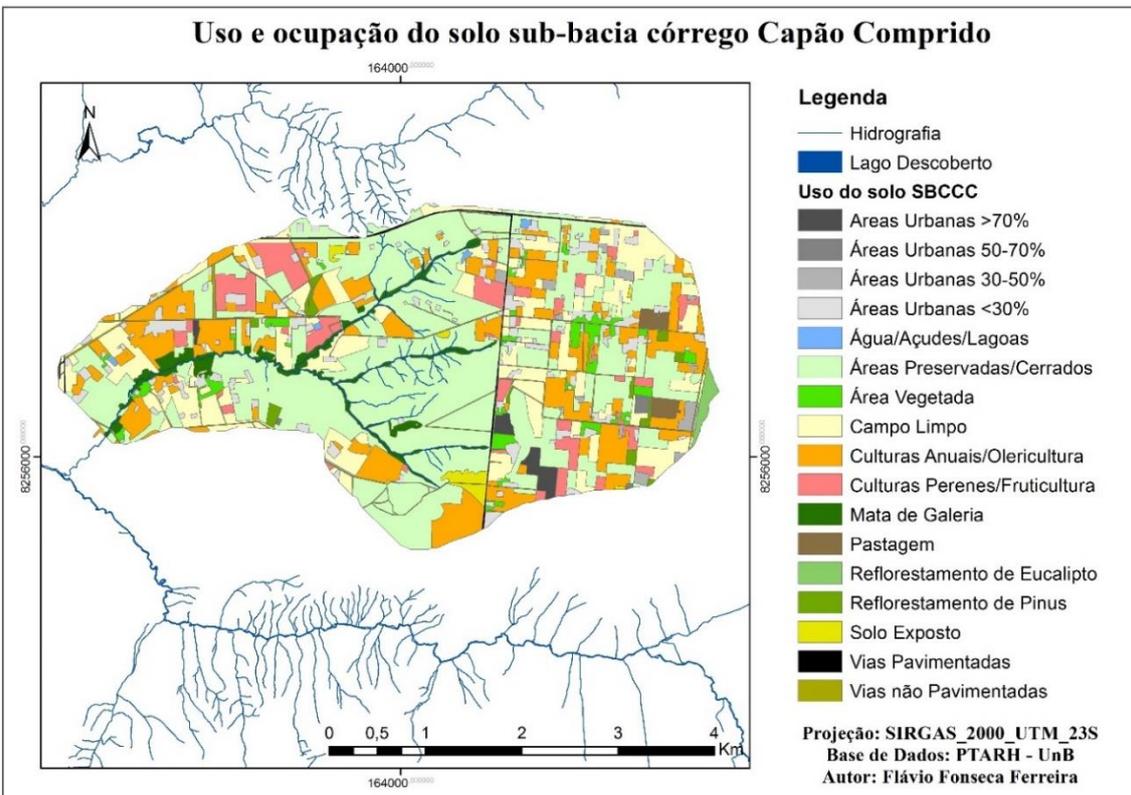


Figura 5.11 - Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do córrego Capão Comprido.

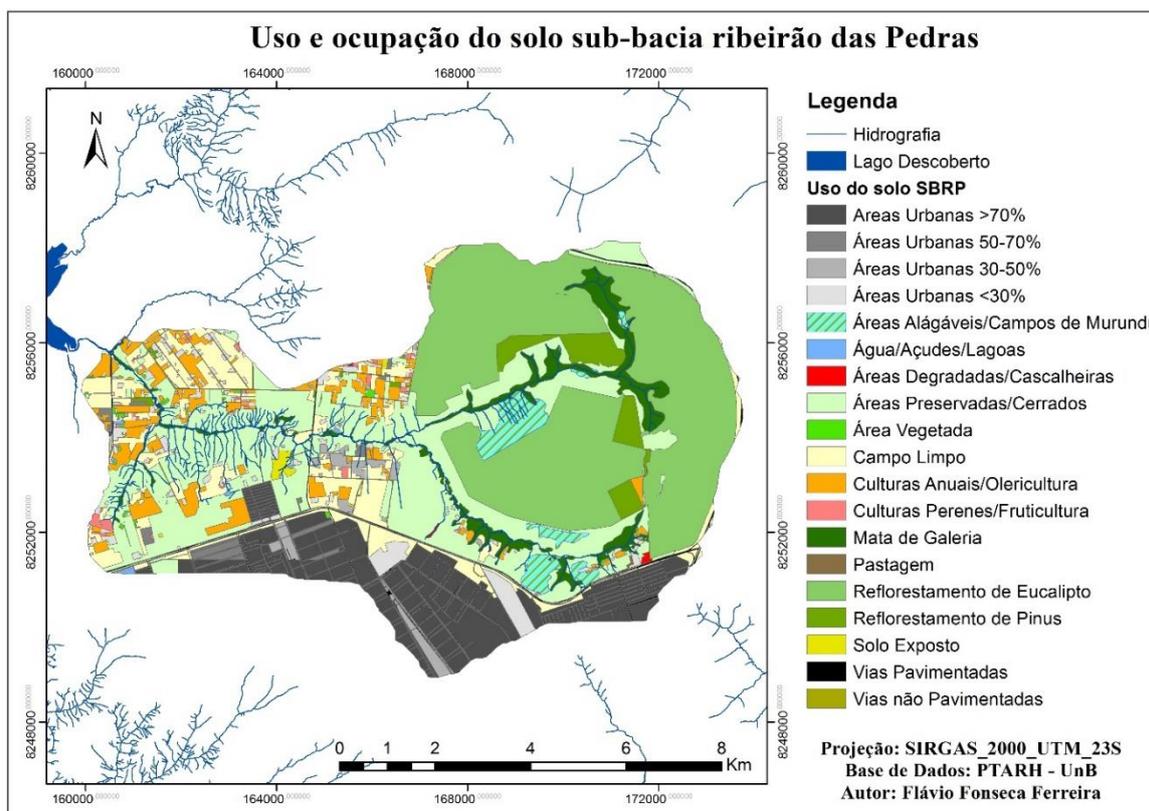


Figura 5.12 - Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do ribeirão das Pedras.

As sub-bacias em estudo possuem como áreas urbanas, considerando alta, média e baixa densidade, os seguintes dados: sub-bacia do rio Descoberto - SBRD (12,9%); sub-bacia do córrego Chapadinha - SBCC (18,3%); sub-bacia do córrego Olaria - SBCO (6,7%); sub-bacia do ribeirão Rodeador - SBRR (3,6%); sub-bacia do córrego Capão Comprido - SBCCC (7,7%); SBRP (17%).

As áreas preservadas, que correspondem a cerrado, campo limpo e mata de galeria, são: sub-bacia do rio Descoberto - SBRD (55,3%); sub-bacia do córrego Chapadinha - SBCC (47,5%); sub-bacia do córrego Olaria - SBCO (41,9%); sub-bacia do ribeirão Rodeador - SBRR (54,6%); sub-bacia do córrego Capão Comprido - SBCCC (62,3%); sub-bacia do ribeirão das Pedras - SBRP (38,6%).

As áreas de agricultura, sejam elas culturas anuais/olericultura e culturas perenes/frucultura: sub-bacia do rio Descoberto - SBRD (18,4%); sub-bacia do córrego Chapadinha - SBCC (15%); sub-bacia do córrego Olaria - SBCO (42,4%); sub-bacia do ribeirão Rodeador - SBRR (28%); sub-bacia do córrego Capão Comprido - SBCCC (21%); sub-bacia do ribeirão das Pedras - SBRP (4,8%).

As áreas de reflorestamento, constituídas por pinus, eucaliptos e outros tipos de vegetação, são: sub-bacia do rio Descoberto - SBRD (7,7%); sub-bacia do córrego Chapadinha - SBCC (7,2%); sub-bacia do córrego Olaria - SBCO (4,6%); sub-bacia do ribeirão Rodeador - SBRR (9,5%); sub-bacia do córrego Capão Comprido - SBCCC (3,5%); sub-bacia do ribeirão das Pedras - SBRP (33,4%).

As sub-bacias consideradas como um todo, possuem como média os seguintes valores percentuais em seu território: 11% constituída por áreas urbanas, 50% de áreas preservadas, 22% de áreas utilizadas para agricultura e aproximadamente 10% de áreas de reflorestamento.

5.2 Modelagem Inicial das sub-bacias e HRUs

O modelo SWAT foi executado considerando todas as HRUs e sub-bacias. A Tabela 5.2 apresenta a quantidade de sub-bacias de drenagem e Unidades de Resposta Hidrológica geradas em cada sub-bacia de estudo.

Tabela 5.2 – Número de sub-bacias de drenagem e de Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) nas sub-bacias estudadas.

Sub-bacias	Sub-Bacias de Drenagem	HRUs
SBRD	11	774
SBCC	5	329
SBCO	9	463
SBRR	23	1278
SBCCC	9	369
SBRP	7	440

Como um primeiro passo e anteriormente à análise de sensibilidade e à calibração propriamente dita, fez-se a comparação gráfica das vazões observadas e simuladas nas sub-bacias em estudo nos anos hidrológicos do período de 2000-2010 e avaliou-se o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) e o coeficiente de determinação (R^2). As Figuras 5.13; 5.14; 5.15; 5.16; 5.17 e 5.18 apresentam os hidrogramas gerados e observados em cada sub-bacia.

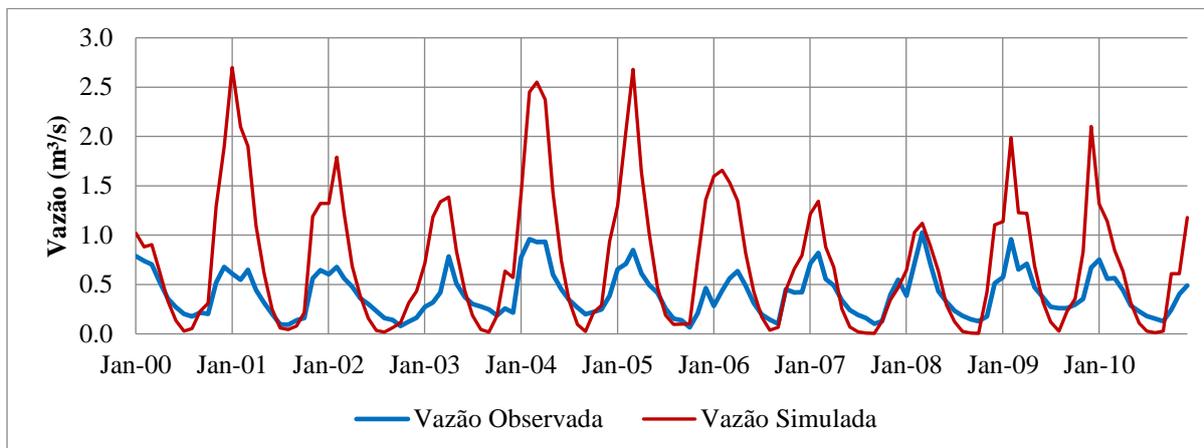


Figura 5.13 - Hidrogramas observado e simulado (sem calibração) da sub-bacia do córrego Chapadinha para os anos hidrológicos correspondentes ao período de 2000 a 2010.

A modelagem inicial da sub-bacia do córrego Chapadinha obteve como resultado o valor de $NS = -5,68$ e $R^2 = 0,70$.

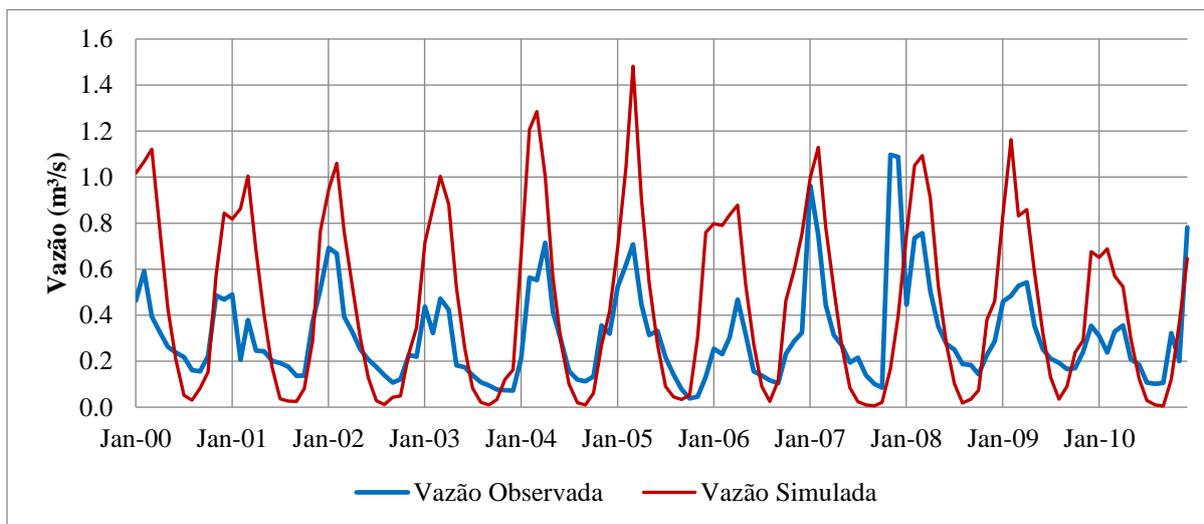


Figura 5.14 - Hidrogramas observado e simulado (sem calibração) da sub-bacia do córrego Capão Comprido para os anos hidrológicos correspondentes ao período de 2000 a 2010.

A modelagem inicial da sub-bacia do córrego Capão Comprido obteve como resultado o valor de $NS = -1,23$ e $R^2 = 0,49$.

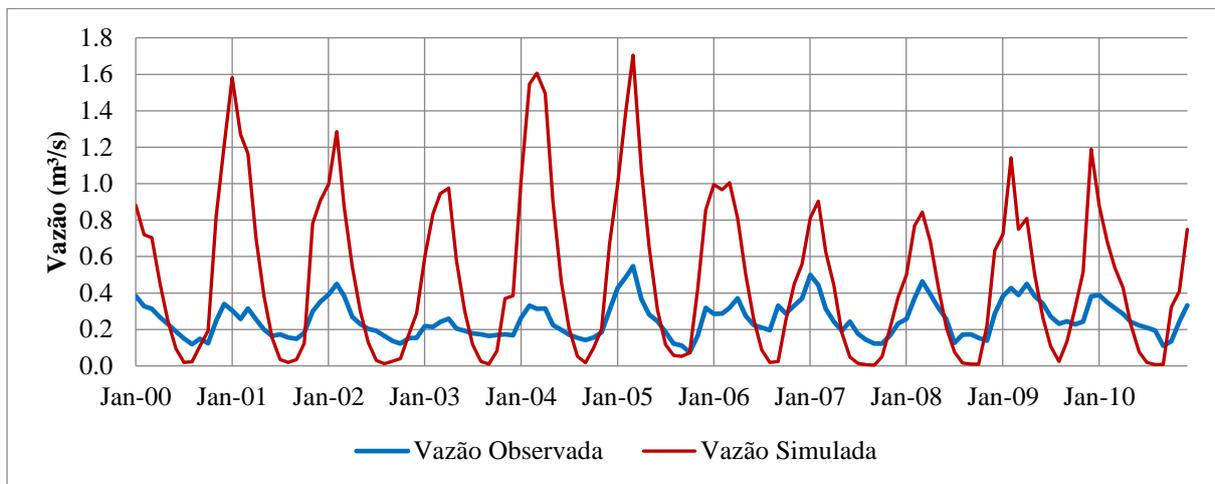


Figura 5.15 - Hidrogramas observado e simulado (sem calibração) da sub-bacia do córrego Olaria para os anos hidrológicos correspondentes ao período de 2000 a 2010.

A modelagem inicial da sub-bacia do córrego Olaria alcançou como resultado o valor de $NS = -18,14$ e $R^2 = 0,58$.

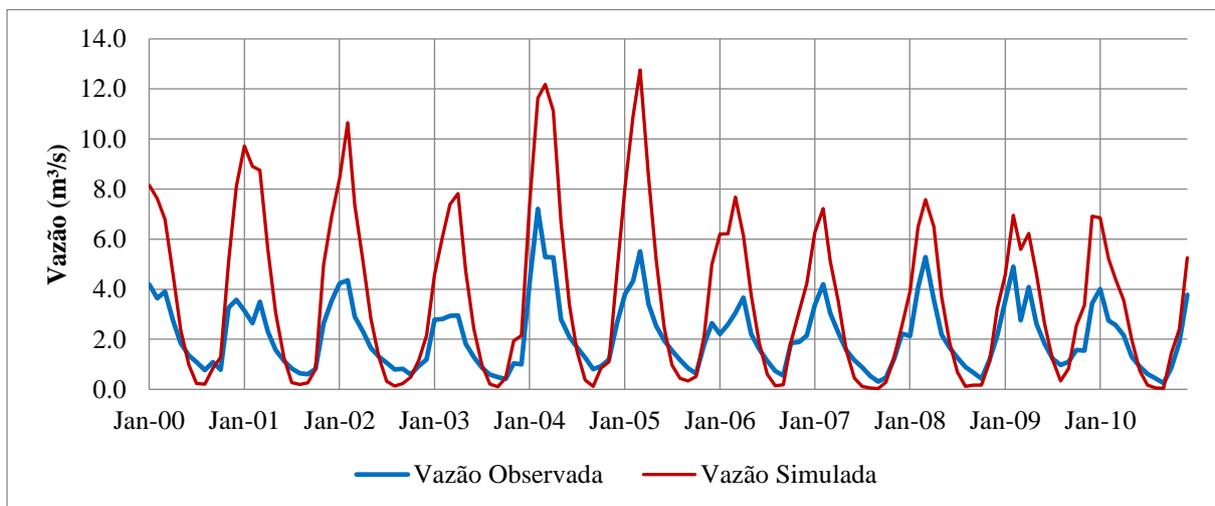


Figura 5.16 - Hidrogramas observado e simulado (sem calibração) da sub-bacia do rio Descoberto para os anos hidrológicos correspondentes ao período de 2000 a 2010.

A modelagem inicial da sub-bacia do ribeirão Descoberto atingiu como resultado o valor de $NS = -2,43$ e $R^2 = 0,87$.

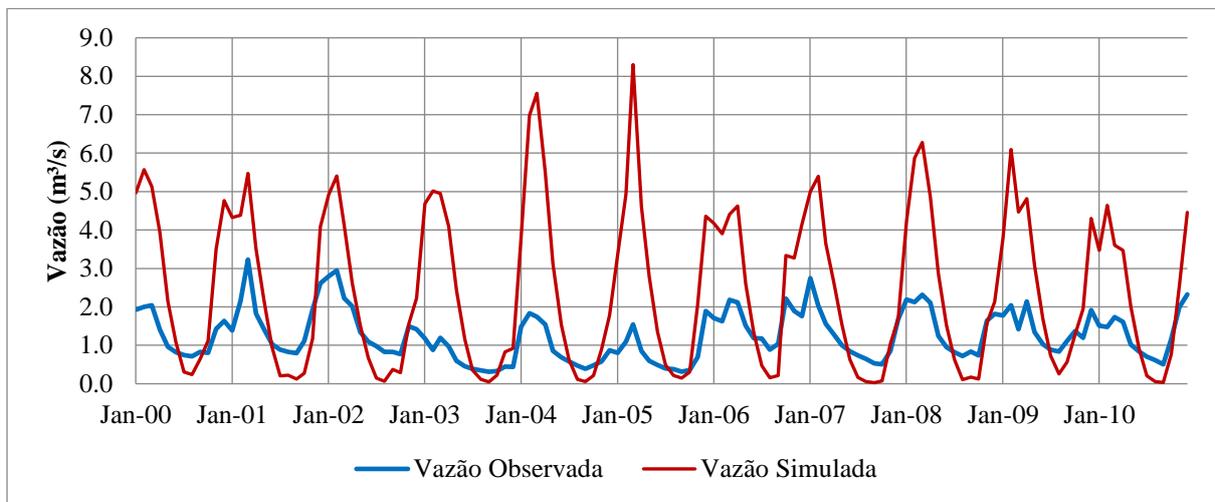


Figura 5.17 - Hidrogramas observado e simulado (sem calibração) da sub-bacia do ribeirão das Pedras para os anos hidrológicos correspondentes ao período de 2000 a 2010.

A modelagem inicial da sub-bacia do ribeirão das Pedras obteve como resultado o valor de NS = -8,53 e $R^2 = 0,56$.

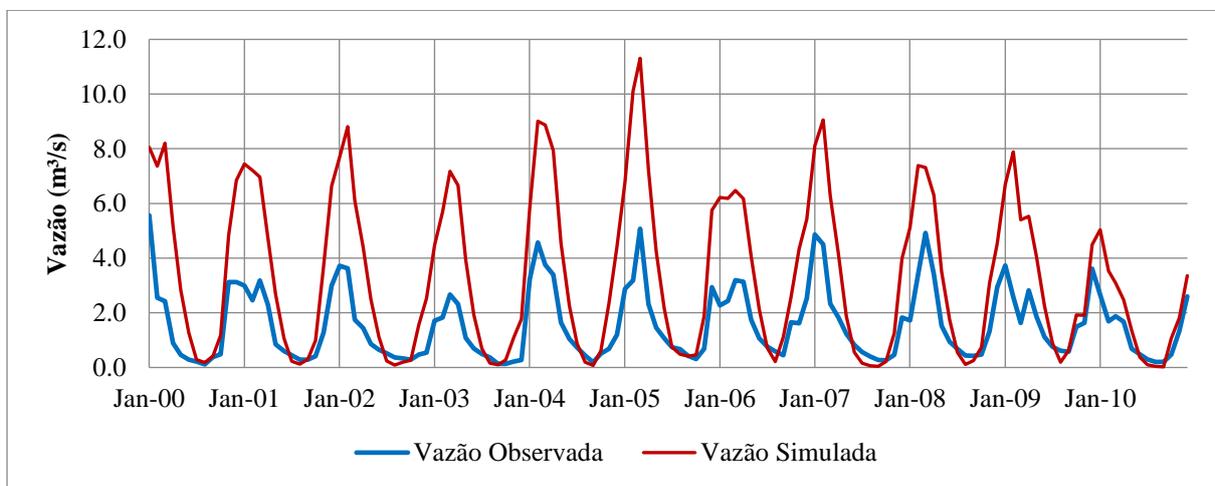


Figura 5.18 - Hidrogramas observado e simulado (sem calibração) da sub-bacia do ribeirão Rodeador para os anos hidrológicos correspondentes ao período de 2000 a 2010.

A modelagem inicial da sub-bacia do ribeirão Rodeador alcançou como resultado o valor de NS = -2,88 e $R^2 = 0,83$.

A partir dos dados obtidos na modelagem inicial, foi calculado a média da vazão observada e simulada no período de análise com o objetivo de comparação, a Tabela 5.3 apresenta os valores obtidos.

Tabela 5.3 – Vazão média observada e simulada na modelagem inicial.

Vazão (m ³ /s)	SBCC	SBCCC	SBCO	SBRD	SBRP	SBRR
Vazão média observada	0,41	0,31	0,25	2,12	1,25	1,57
Vazão média simulada	0,73	0,47	0,48	3,62	2,41	3,35

Observando os resultados presentes na tabela, nota-se que a vazão média simulada foi superestimada para todas as sub-bacias em estudo, no qual para a SBCC houve um aumento percentual em relação a vazão média observada de 78%, para as SBCCC um aumento de 52%, para a SBCO um aumento de 92%, para a SBRD um aumento de 71%, para a SBRP um aumento de 93% e para a SBRR um aumento de 113%.

As respostas de Nash-Sutcliffe mostram estatisticamente que os resultados simulados pelo modelo foram pouco favoráveis, possuindo valores negativos em todos os casos, sendo esses valores considerados insatisfatórios para a modelagem. Em relação ao coeficiente de determinação (R^2), os valores são considerados adequados para a modelagem. A Tabela 5.4 apresenta a síntese da avaliação estatística dos resultados iniciais obtidos das sub-bacias em estudo.

Tabela 5.4 - Avaliação estatística da modelagem inicial das sub-bacias.

Função Objetivo	SBCC	SBCCC	SBCO	SBRD	SBRP	SBRR
NSE	-5,68	-1,23	-18,14	-2,43	-8,53	-2,88
R^2	0,70	0,49	0,58	0,87	0,56	0,83

Em estudos de Green and van Griensven (2008) e Wu e Chen (2009), foram adotados os valores de $NSE \geq 0,4$ e $R^2 > 0,5$ como aceitáveis para a avaliação do modelo, neste trabalho será adotado o valor de $NSE > 0,5$ e a mesma limitação do R^2 , a fim de averiguar a consistência do modelo.

Observa-se que o modelo superestimou os picos de vazão em todas as sub-bacias simuladas e subestimou as vazões em períodos de estiagem nas sub-bacias do córrego

Chapadinha, córrego Capão Comprido e córrego Olaria em comparação com as sub-bacias do rio Descoberto, ribeirão das Pedras e ribeirão Rodeador.

A avaliação do comportamento inicial do modelo SWAT foi feita com o objetivo de auxiliar na interpretação do sistema hidrológico modelado, no qual foi verificado a necessidade de realizar a calibração do modelo e contribuindo na seleção dos parâmetros, a fim de alcançar um melhor ajuste entre os valores de vazão observados e simulados pelo modelo SWAT.

5.3 Seleção dos Parâmetros e Análise de sensibilidade

Com base nos estudos de Ferrigo (2014) nas sub-bacia do rio Descoberto, foram selecionados 14 parâmetros determinados como relevantes para a diminuição dos erros na modelagem, de forma a resultar em uma melhoria na proximidade dos valores simulados em relação aos valores observados de vazão. A delimitação dos intervalos foi determinada de acordo com a avaliação da variação fisicamente possível de cada parâmetro (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 - Características dos parâmetros utilizados na análise de sensibilidade nas sub-bacia em estudo (adaptado de Ferrigo, 2014).

Parâmetro	Descrição	Unidade	Valores Iniciais	Método	Intervalo	
					Mínimo	Máximo
CN2	Curva número na condição II	adim	50 (média)	x	-0,3	0,2
ALPHA_BF	Constante de recessão do fluxo de base	dias	0.0048	=	0	1
GW_DELAY	Tempo de retardo da água subterrânea	dias	31	+	-20	450
GWQMN	Limiar da profundidade da água no aquífero superficial necessária para o fluxo de retorno ocorrer	mm	0	=	0	1228

GW_REVAP	Coefficiente "revap" de água subterrânea	adim	0,02	=	0,02	0,1
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo	adim	0,95	=	0,4	1
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo	mm/mm	0,12 (média)	x	-0,2	0,5
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo	mm/h	932 (média)	x	-1,95	0,8
SOL_BD	Densidade aparente do solo	[g/cm ³]	0,95 (média)	x	-0,93	-0,6
SHALLST	Altura inicial da água no aquífero raso	mm	1000	=	1000	5000
GWHT	Altura inicial da água subterrânea	mm	12	=	0	25
DEEPST	Altura inicial da água no aquífero profundo	mm	2000	=	0	3000
REVAPMN	Profundidade em aquífero profundo para que aconteça o "revap"	mm	1	=	0	500
ANION_EXCL	Fração de porosidade (espaços vazios) a partir da qual os ânions são excluídos.	adim	0,5	=	0,1	1

*adim: adimensional; x: multiplicar; =: igualar; +: adicionar.

Os resultados da sensibilidade global foram agrupados na Tabela 5.6, elencando os parâmetros mais significativos no ajuste da vazão no modelo SWAT para as sub-bacias estudadas.

Tabela 5.6: Parâmetros mais sensíveis na vazão das sub-bacias em estudo.

Sub-bacia	Grau de sensibilidade				
	1°	2°	3°	4°	5°
SBCC	GW_DELAY	ESCO	CN2	SOL_K	SOL_AWC
SBCCC	ESCO	GW_DELAY	SOL_BD	SOL_AWC	DEEPST
SBCO	GW_DELAY	ESCO	CN2	SOL_K	SOL_BD
SBRD	ESCO	GW_DELAY	SOL_AWC	SOL_BD	REVAPMN
SBRP	GW_DELAY	ESCO	SOL_K	CN2	SOL_AWC
SBRR	ESCO	GW_DELAY	SOL_AWC	SOL_BD	SHALLST

A partir da análise de sensibilidade, pode-se observar que o parâmetro mais sensível ficou intercalado entre o GW_DELAY e o parâmetro ESCO. O intervalo de tempo para a recarga do aquífero (GW_DELAY), está relacionado ao movimento da água no solo, sendo dependente do tipo de solo, do índice de vazios que permite a infiltração e influencia na velocidade de movimentação da água em direção ao aquífero, bem como do uso do solo, pois maior impermeabilização modifica o processo de entrada de água no solo, prejudicando o fenômeno de recarga do aquífero, diminuindo conseqüentemente o tempo de recarga.

O fator de compensação da evaporação do solo (ESCO), tem como função modificar a distribuição da profundidade a fim de conhecer a demanda evaporativa do solo e estimar os efeitos da capilaridade. Segundo Kannan *et al.* (2007), uma mudança no fator de compensação de evaporação do solo (ESCO) afeta todos os componentes do balanço hídrico. Em geral a predição da vazão torna-se próxima à vazão observada quando o valor de ESCO está próximo ao seu máximo. Nesse sentido, devido ao seu nível de sensibilidade ser um dos maiores nas sub-bacias em estudo, possui importante papel nos processos do ciclo hidrológico, e especificamente no quantitativo da vazão.

A condutividade hidráulica saturada do solo (SOL_K) é um parâmetro de grande influência na movimentação da água no solo, principalmente no processo de infiltração, pois está diretamente relacionado ao tempo de percolação. De acordo com Ferrigo (2014), O parâmetro SOL_K interfere no fluxo de base, pois é responsável pelo fluxo horizontal na zona saturada, e isso pode ser determinante na simulação da vazão em épocas de estiagem,

influenciando principalmente na velocidade da drenagem do solo nessa época. Devido a esse fato, é um parâmetro importante na simulação do decaimento da vazão após o período chuvoso.

A densidade aparente do solo (SOL_BD) relaciona a massa das partículas sólidas com o volume total do solo. De acordo com Ferrigo (2014), a densidade do solo é inversamente proporcional à porosidade do solo, o que significa que quanto menor a densidade do solo, maior a porosidade e, com isso, maior é a quantidade de água possível de se movimentar nomeio, podendo influenciar no aumento da vazão.

A capacidade de água disponível no solo (SOL_AWC) é de grande importância pelo fato de influenciar na saturação do solo, o que está diretamente ligado à vazão. Kannan *et al.* (2007), avaliando a sensibilidade de alguns parâmetros nos componentes do balanço hídrico, observaram que o SOL_AWC apresenta uma relação inversa com diversos componentes do balanço hídrico, isto é, um aumento no valor de SOL_AWC diminui o fluxo de base e aumenta a infiltração. Por este motivo, é considerado um parâmetro relevante no aspecto quantitativo da vazão no processo de simulação.

A curva número na condição II (CN2) é um parâmetro importante no cálculo do volume de escoamento superficial. É um número adimensional e obtido em função da capacidade de infiltração, do tipo de solo, do uso do solo e das condições antecedentes de umidade no solo. É um parâmetro que pode variar bastante em várias regiões e locais presentes em uma mesma sub-bacia, influenciando diretamente o deflúvio.

Verificando os parâmetros de maior sensibilidade na vazão em cada sub-bacia, é possível perceber que o movimento da água no solo é de grande importância pela presença dos parâmetros SOL_K, SOL, BD E SOL_AWC, e que a interação no solo entre as camadas superficiais e o aquífero raso é de grande relevância para a manutenção dos mananciais e consequentemente para a vazão das sub-bacias afluentes ao lago Descoberto.

5.4 Calibração do Modelo SWAT para as sub-bacias

A calibração automática dos 14 parâmetros escolhidos foi realizada com 700 iterações para cada sub-bacia dentro dos intervalos adotados na análise de sensibilidade. A calibração foi realizada para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010. A Figuras 5.19; 5.20; 5.21; 5.22; 5.23 e 5.24 apresentam os hidrogramas observado e simulado das sub-bacias em estudo após a calibração automática dos parâmetros.

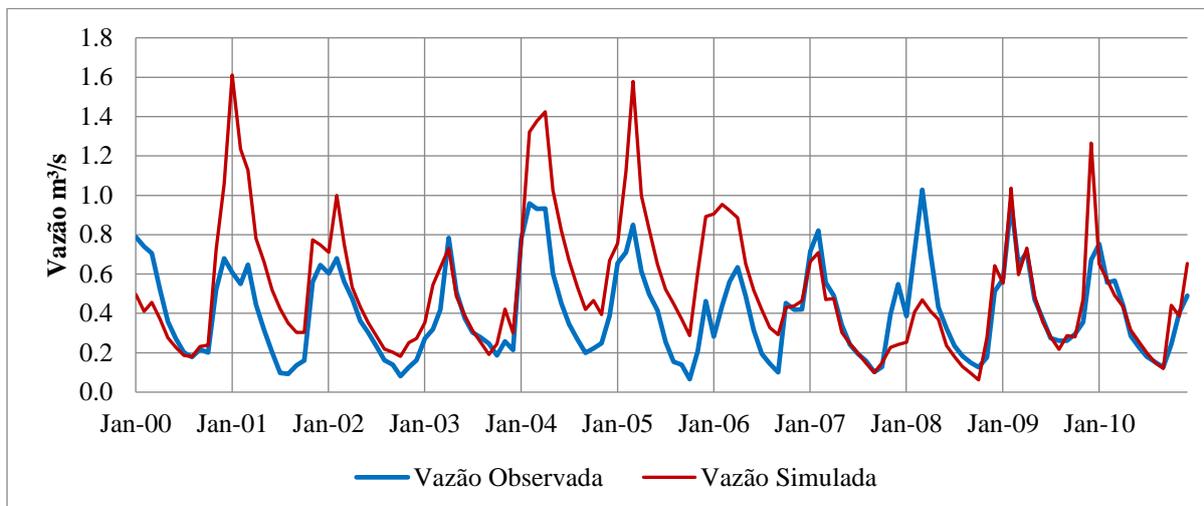


Figura 5.19 - Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do córrego Chapadinha após a calibração dos parâmetros.

A modelagem da primeira calibração da sub-bacia do córrego Chapadinha alcançou como resultado o valor de $NS = -0,20$ e o valor de $R^2 = 0,52$.

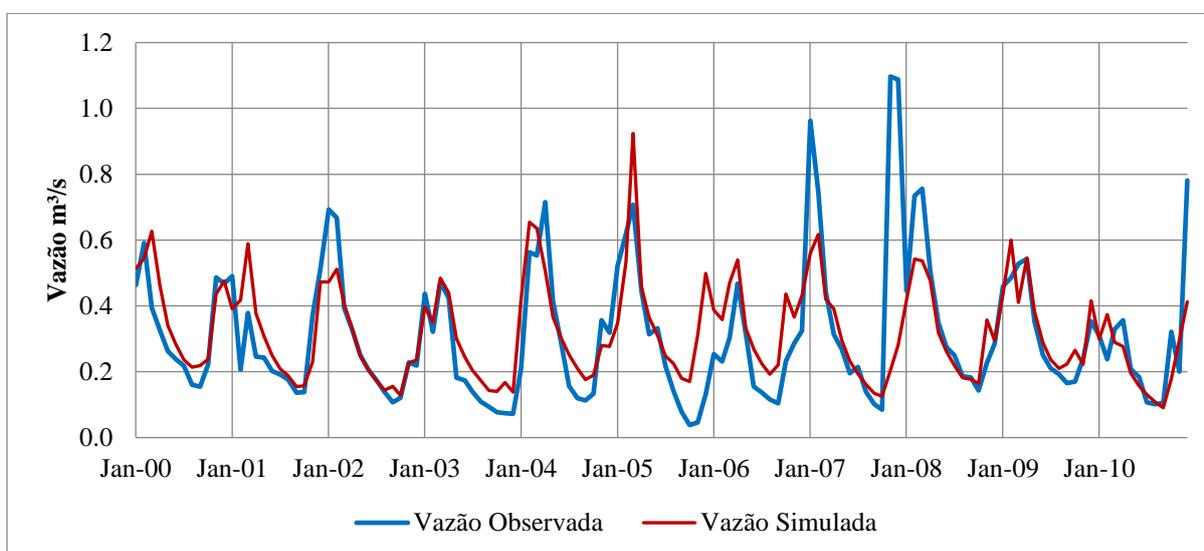


Figura 5.20 - Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do córrego Capão Comprido após a calibração dos parâmetros.

A modelagem da primeira calibração da sub-bacia do córrego Capão Comprido obteve o valor de $NS = 0,46$ e o valor de $R^2 = 0,47$.

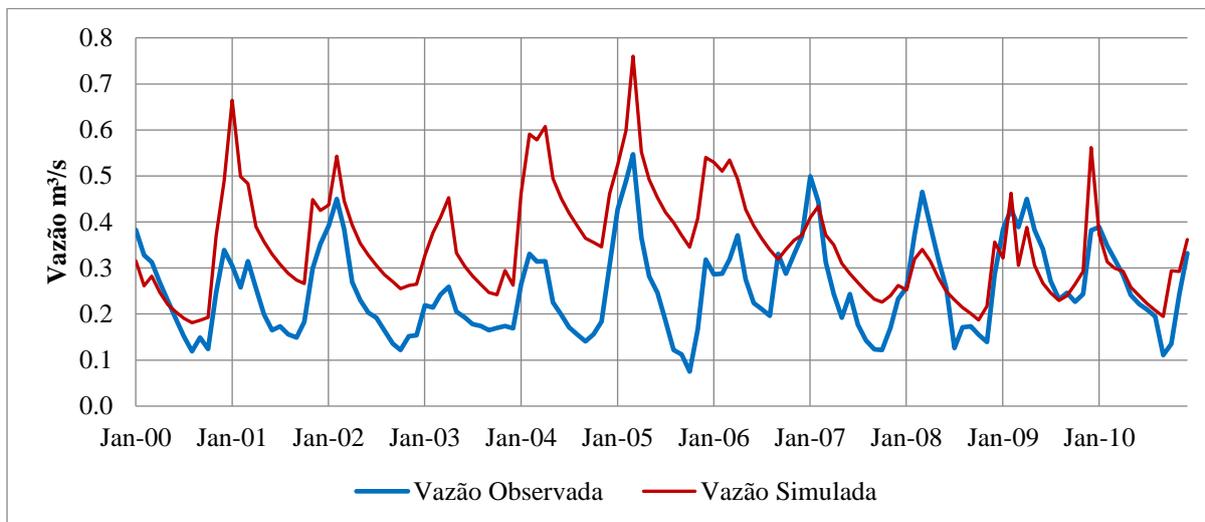


Figura 5.21 - Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do córrego Olaria após a calibração dos parâmetros.

A modelagem da primeira calibração da sub-bacia do córrego Olaria alcançou como resultado o valor de $NS = -0,98$ e o valor de $R^2 = 0,33$.

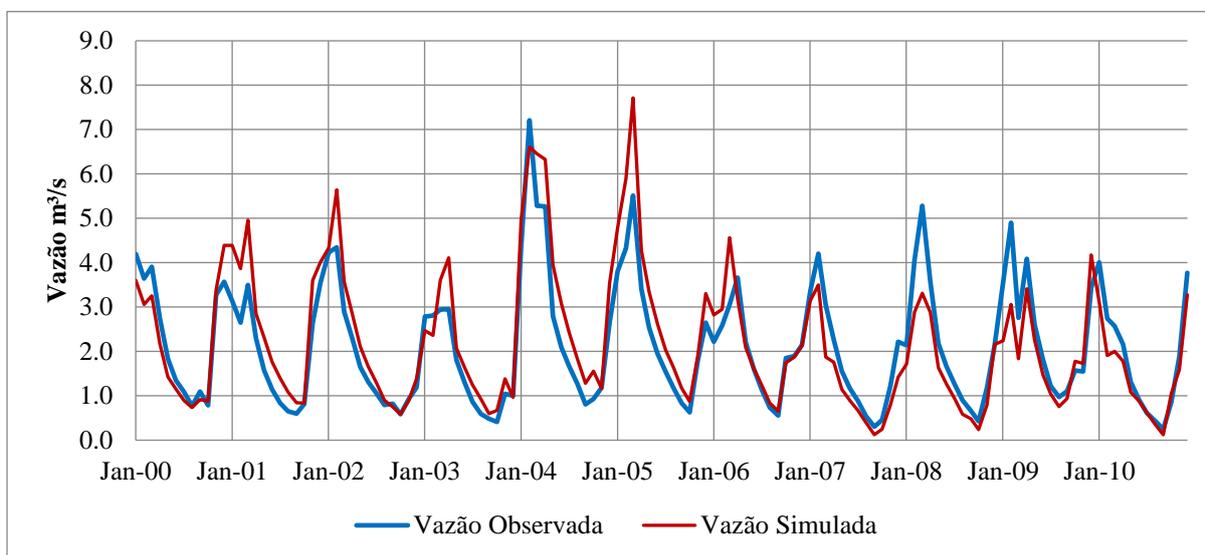


Figura 5.22 - Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do rio Descoberto após a calibração dos parâmetros.

A modelagem da primeira calibração da sub-bacia do rio Descoberto atingiu como resultado o valor de $NS = 0,76$ e o valor de $R^2 = 0,81$.

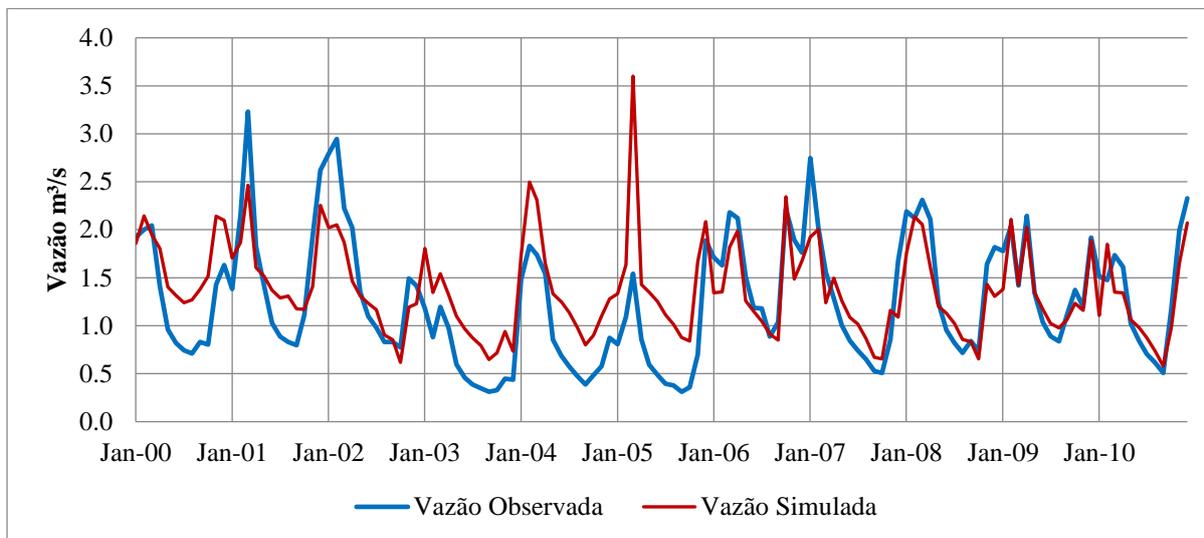


Figura 5.23 - Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do ribeirão das Pedras após a calibração dos parâmetros.

A modelagem da primeira calibração da sub-bacia do ribeirão das Pedras alcançou como resultado o valor de $NS = 0,54$ e o valor de $R^2 = 0,58$.

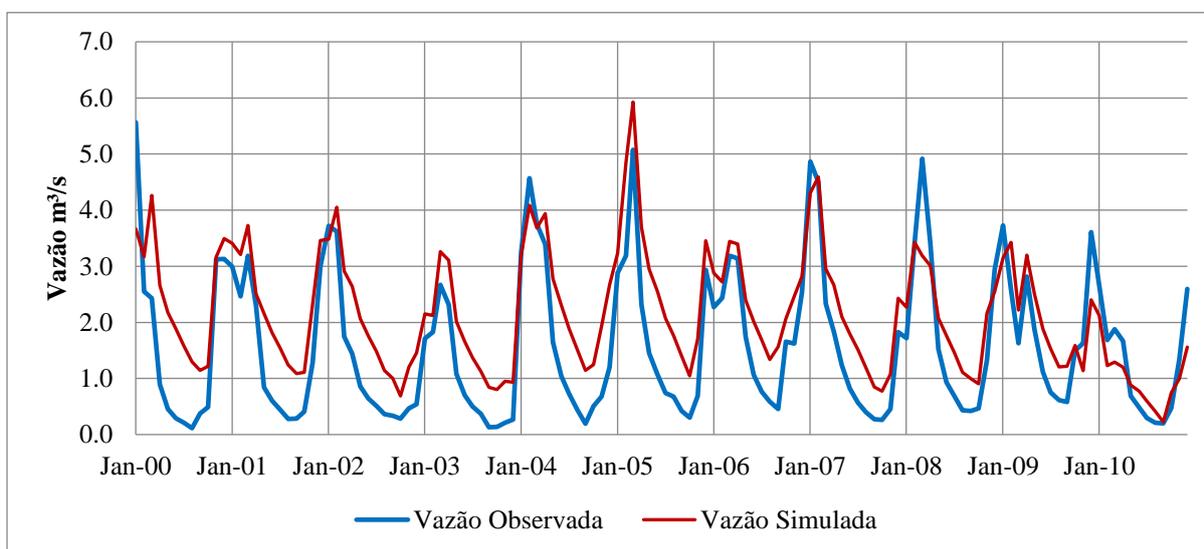


Figura 5.24 - Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do ribeirão Rodeador após a calibração dos parâmetros.

A modelagem da primeira calibração da sub-bacia do ribeirão Rodeador obteve como resultado o valor de $NS = 0,55$ e o valor de $R^2 = 0,76$.

Em relação aos hidrogramas apresentados nas Figuras acima pode-se notar que o modelo não foi capaz de representar diversos picos de vazão observados durante o período chuvoso, e algumas vezes simulou picos maiores que os registrados, como observa-se principalmente presente nas sub-bacias do córrego Chapadinha e córrego Olaria. Além disso, nota-se que o modelo superestimou moderadamente a vazão nos períodos de estiagem, especialmente na sub-bacias do ribeirão das Pedras e do ribeirão Rodeador.

Realizou-se o cálculo da média da vazão observada e simulada com os parâmetros calibrados para o período de análise, a fim de comparar os dados, a Tabela 5.7 apresenta os valores obtidos.

Tabela 5.7 – Vazão média observada e simulada na modelagem da primeira calibração.

Vazão (m ³ /s)	SBCC	SBCCC	SBCO	SBRD	SBRP	SBRR
Vazão média observada	0,41	0,31	0,25	2,12	1,25	1,57
Vazão média simulada	0,52	0,32	0,35	2,21	1,38	2,15

Observando os resultados presentes na tabela x, nota-se que a vazão média simulada após a calibração foi superestimada para todas as sub-bacias em estudo, no entanto, a discrepância diminuiu de maneira considerável em relação a modelagem inicial sem calibração, no qual para a SBCC houve um aumento percentual em relação a vazão média observada de 27%, para as SBCCC um aumento de 3%, para a SBCO um aumento de 40%, para a SBRD um aumento de 4%, para a SBRP um aumento de 10% e para a SBRR um aumento de 37%.

Constata-se uma expressiva melhora na representação do modelo na simulação da vazão, quando comparado aos valores obtidos sem calibração. A Tabela 5.8 apresenta a síntese dos resultados da função objetivo obtido para cada sub-bacia após o processo de calibração.

Tabela 5.8 - Avaliação estatística da modelagem da primeira calibração das sub-bacias.

Função Objetivo	SBCC	SBCCC	SBCO	SBRD	SBRP	SBRR
NSE	-0,20	0,46	-0,98	0,76	0,54	0,55
R ²	0,52	0,47	0,33	0,81	0,58	0,76

As sub-bacias do rio Descoberto, ribeirão Rodeador e ribeirão das Pedras apresentaram $NS \geq 0,5$ e considerados satisfatórios para a análise, no entanto, as sub-bacias do córrego Chapadinha, Olaria e Capão Comprido apresentaram $NS < 0,5$ sendo considerados

inadequados, no qual a simulação do córrego Chapadinha e Olaria apresentaram NS com valores negativos, apontando fundamentalmente como um valor inaceitável e inconsistente.

Dessa forma, após uma nova rotina de calibração não se atingiu uma melhora significativa dos valores da função objetivo para estas sub-bacias em questão, e, portanto, decidiu-se adotar novos parâmetros no processo de calibração que influenciam diretamente no deflúvio, a fim de buscar atingir uma melhor representação dos dados simulados e observados de vazão.

Após a apreciação de trabalhos recentes realizados em bacias inseridas no território do Distrito Federal (Sarmiento, 2010; Monsalve-Herrera, 2013; Ferrigo, 2014; Nunes, 2016, Fim, 2018), selecionou-se sete parâmetros que estão relacionados ao deflúvio. A Tabela 5.9 apresenta os novos parâmetros adicionados na calibração das sub-bacias do córrego Chapadinha, córrego Capão Comprido e córrego Olaria.

Tabela 5.9 – Parâmetros adicionados para calibração das sub-bacias do córrego Chapadinha (SBCC), córrego Capão Comprido (SBCCC) e córrego Olaria (SBCO).

Parâmetro	Descrição	Unidade	Método	Intervalo	
				Mínimo	Máximo
ALPHA_BF	Fator alpha do escoamento de Base.	dias	=	0	1
CANMX	Armazenamento máximo no dossel das plantas.	mm	=	0	100
CH_N2	Número de Manning para o canal principal.	adim	=	-0,01	0,3
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva no canal aluvial principal.	mm/ano	=	-0,01	500
EPCO	Fator de compensação de retirada das plantas.	adim	=	0	1
RCHRG_DP	Fração de percolação do aquífero profundo	adim	=	0	1
SURLAG	Coefficiente de atraso do escoamento superficial.	dias	=	0,05	24

*adim: adimensional; =: igualar.

Uma nova simulação foi realizada considerando 700 iterações, adicionando-se os novos parâmetros na análise, Os resultados da sensibilidade global foram agrupados na Tabela 5.10, agrupando os parâmetros mais significativos no ajuste da vazão no modelo SWAT para a segunda calibração das sub-bacias do córrego Chapadinha (SBCC), córrego Capão Comprido (SBCCC) e córrego Olaria (SBCO).

Tabela 5.10: Parâmetros mais sensíveis na vazão da SBCC, SBCCC e SBCO.

Sub-bacia	Grau de sensibilidade				
	1°	2°	3°	4°	5°
SBCC	ALPHA_BNK	SHALLST	CANMX	SOL_K	SOL_AWC
SBCCC	RCHRG_DP	CANMX	GW_DELAY	EPCO	CH_K2
SBCO	RCHRG_DP	GW_DELAY	EPCO	CANMX	GWQMN

Entre os novos parâmetros adicionados, observa-se que quatro deles estão presentes nas cinco primeiras posições em grau de sensibilidade nas sub-bacias analisadas (ALPHA_BNK, CANMX, EPCO, RCHRG_DP), indicando que tem grande influência na variável em estudo, no caso a vazão. O destaque pode ser dado ao parâmetro RCHRG_DP, relacionado a fração de percolação da zona radicular que recarrega o aquífero profundo e ao parâmetro CANMX, referente ao armazenamento máximo de água no dossel vegetativo, ou seja, a cobertura pode afetar significativamente na infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial, consequentemente influencia na erosão, no qual depende da densidade foliar e da morfologia das espécies presentes na superfície.

Os hidrogramas observado e simulado com a nova calibração seguem nas figuras 5.25; 5.26 e 5.27.

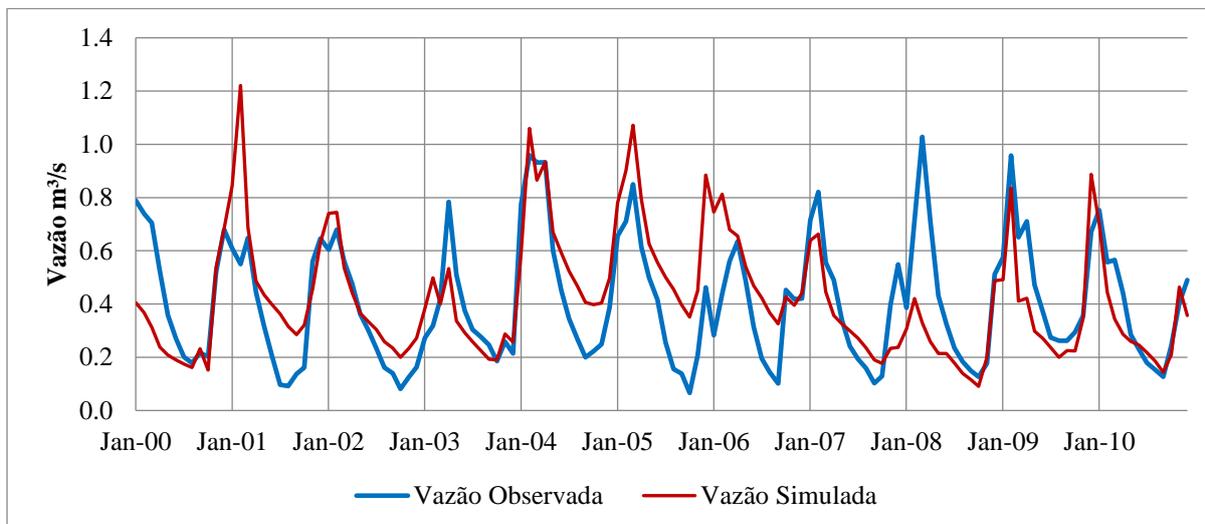


Figura 5.25 - Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do córrego Chapadinha após a segunda calibração dos parâmetros.

A modelagem da segunda calibração da sub-bacia do córrego Chapadinha obteve como resultado o valor de $NS = 0,36$ e o valor $R^2 = 0,45$.

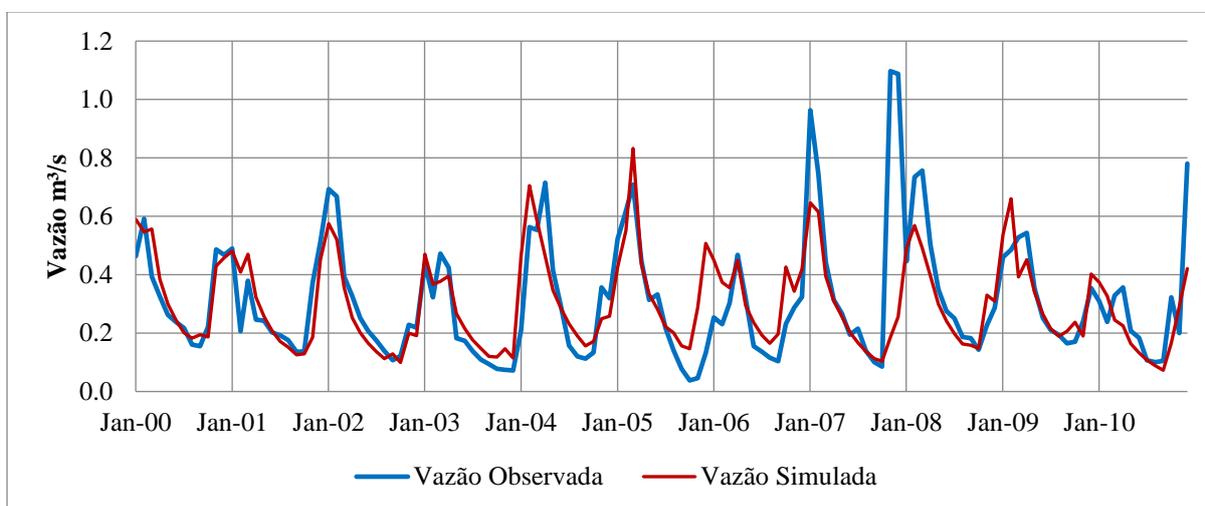


Figura 5.26 - Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do córrego Capão Comprido após segunda calibração dos parâmetros.

A modelagem da segunda calibração da sub-bacia do córrego Capão Comprido atingiu como resultado o valor de $NS = 0,50$ e o valor de $R^2 = 0,49$.

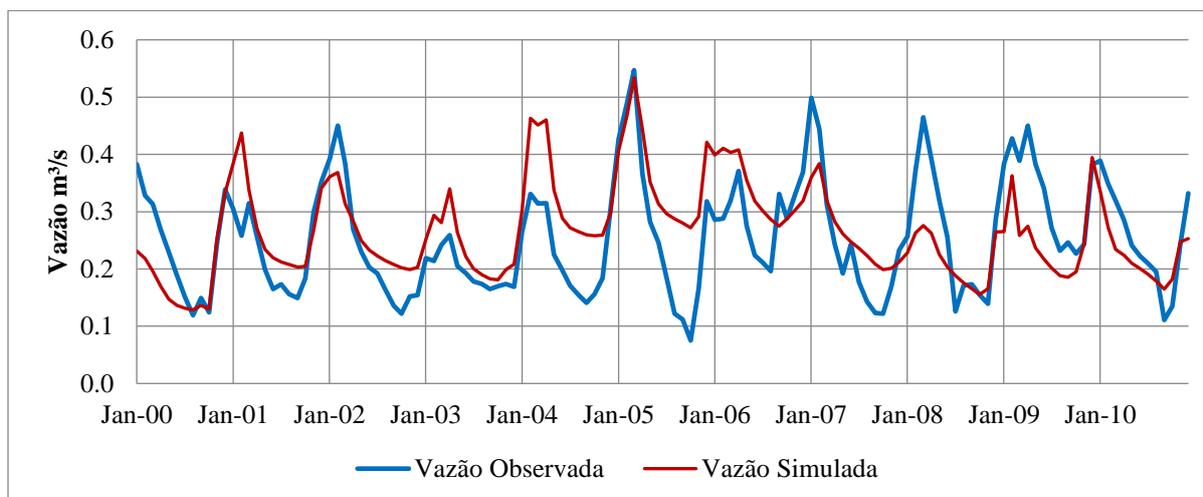


Figura 5.27 - Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia do córrego Olaria após segunda calibração dos parâmetros.

A modelagem da segunda calibração da sub-bacia do córrego Olaria obteve como resultado o valor de NS = 0,35 e o valor de $R^2 = 0,41$.

Após a etapa de calibração realizada com os novos parâmetros adicionados, observou-se uma evolução no coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e no coeficiente de determinação (R^2), no entanto, apenas a sub-bacia do córrego Capão Comprido alcançou valores considerados satisfatórios para a simulação, a Tabela 5.11 apresenta a síntese dos novos valores da função objetivo para a sub-bacia do córrego Chapadinha (SBCC), sub-bacia do córrego Capão Comprido (SBCCC) e sub-bacia do córrego Olaria (SBCO).

Tabela 5.11 - Avaliação estatística da modelagem da segunda calibração da SBCC, SBCCC E SBCO.

Função Objetivo	SBCC	SBCCC	SBCO
NSE	0,36	0,50	0,35
R^2	0,45	0,49	0,41

Com o intuito de verificar os dados, realizou-se o cálculo da média da vazão observada e a média da vazão simulada pelo modelo com os novos parâmetros adicionados e calibrados para o período de análise, a Tabela 5.12 apresenta os valores obtidos.

Tabela 5.12 – Vazão média observada e simulada na modelagem da segunda calibração.

Vazão (m ³ /s)	SBCC	SBCCC	SBCO
Vazão média observada	0,41	0,31	0,25
Vazão média simulada	0,42	0,31	0,27

Os resultados presentes na tabela 5.12 mostram que a vazão média simulada após a segunda calibração foi superestimada para as sub-bacias do córrego Chapadinha e do córrego Olaria. A diferença, no entanto, sofreu uma grande diminuição comparada ao modelo sem calibração e se aproximou bastante da vazão média observada no período em estudo, no qual para a SBCC houve um aumento percentual em relação a vazão média observada de 2,5% e para as SBCO um aumento de 8%. Na SBCCC a vazão média simulada foi igual a vazão média observada no período em análise.

5.5 Verificação do Modelo SWAT para as sub-bacias

Posteriormente a calibração do modelo em nível mensal para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010 em cada sub-bacia monitorada presente no alto Descoberto, foi realizada a verificação do modelo para o período de janeiro de 2011 a dezembro de 2017, com o propósito de averiguar a eficiência dos ajustes dos parâmetros na simulação das sub-bacias, utilizando como métrica os mesmos coeficientes aplicados na etapa de calibração, o NSE e R². As Figuras 5.28; 5.29; 5.30; 5.31; 5.32 e 5.33 apresentam os hidrogramas obtidos para a sub-bacias em estudo.

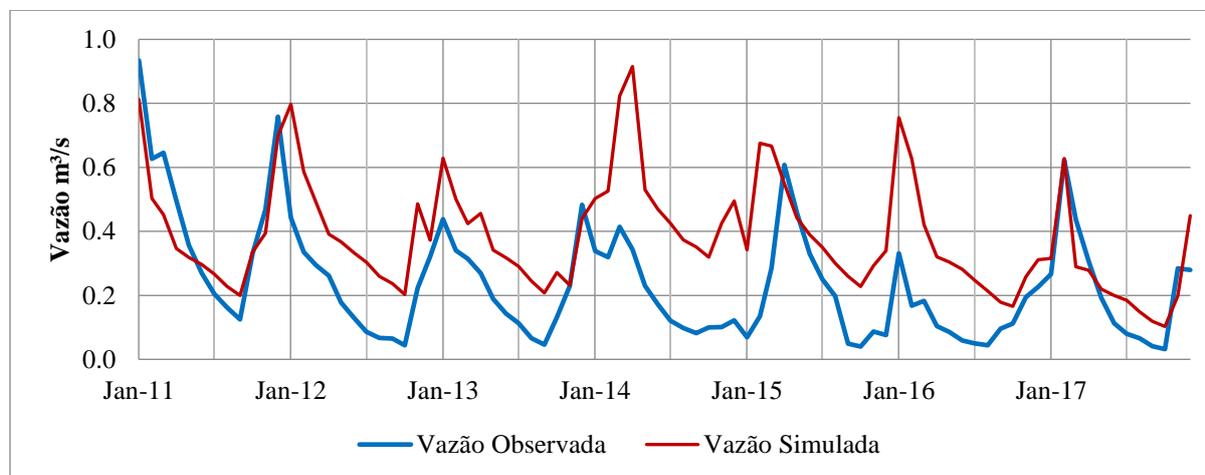


Figura 5.28 - Hidrogramas observado e simulado na verificação da sub-bacia do córrego Chapadinha.

A verificação do modelo na sub-bacia do córrego Chapadinha obteve como resultado o valor de NS = -0,10 e o valor $R^2 = 0,40$.

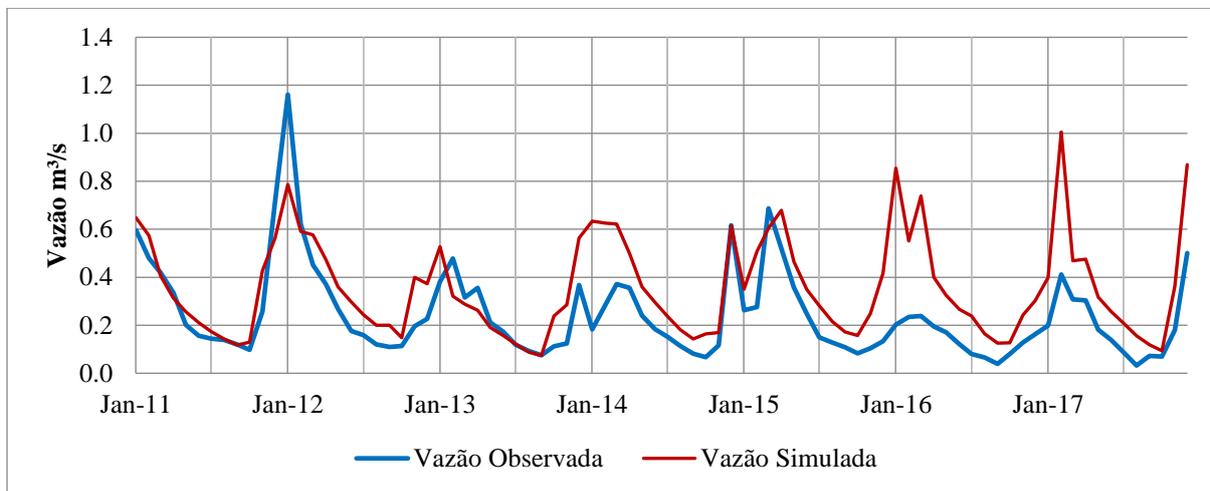


Figura 5.29 - Hidrogramas observado e simulado na verificação da sub-bacia do córrego Capão Comprido.

A verificação do modelo na sub-bacia do córrego Capão Comprido alcançou como resultado o valor de NS = 0,21 e o valor $R^2 = 0,53$.

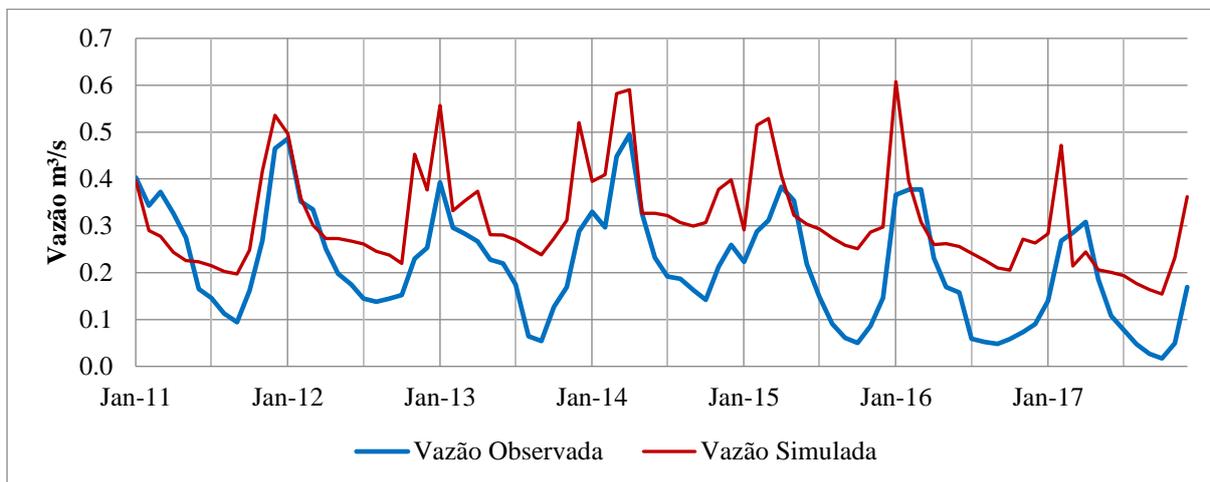


Figura 5.30 - Hidrogramas observado e simulado na verificação da sub-bacia do córrego Olaria.

A verificação do modelo na sub-bacia do córrego Olaria atingiu como resultado o valor de NS = 0,17 e o valor $R^2 = 0,55$.

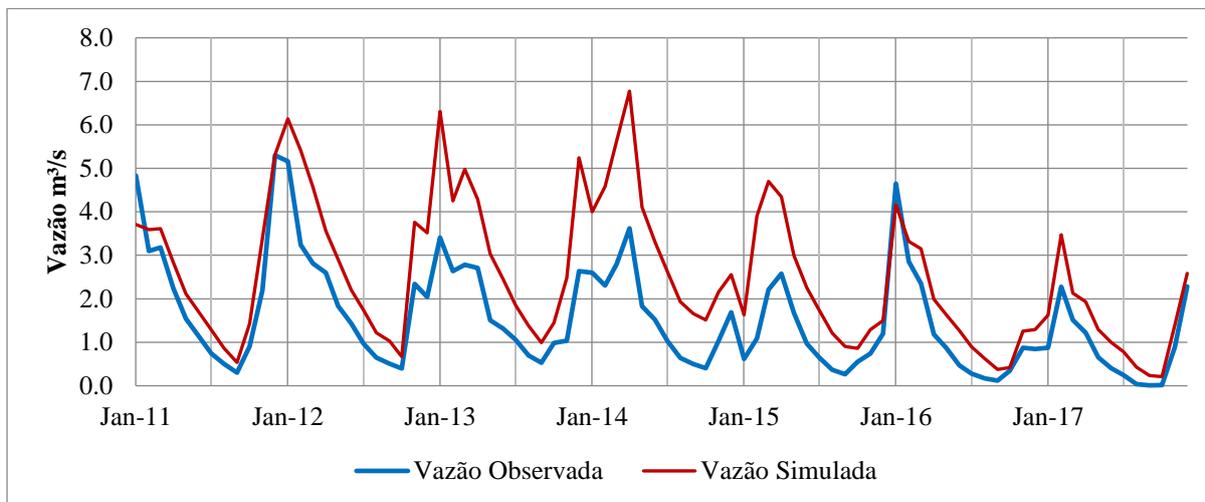


Figura 5.31 - Hidrogramas observado e simulado na verificação da sub-bacia do rio Descoberto.

A verificação do modelo na sub-bacia do rio Descoberto obteve como resultado o valor de $NS = 0,15$ e o valor $R^2 = 0,78$

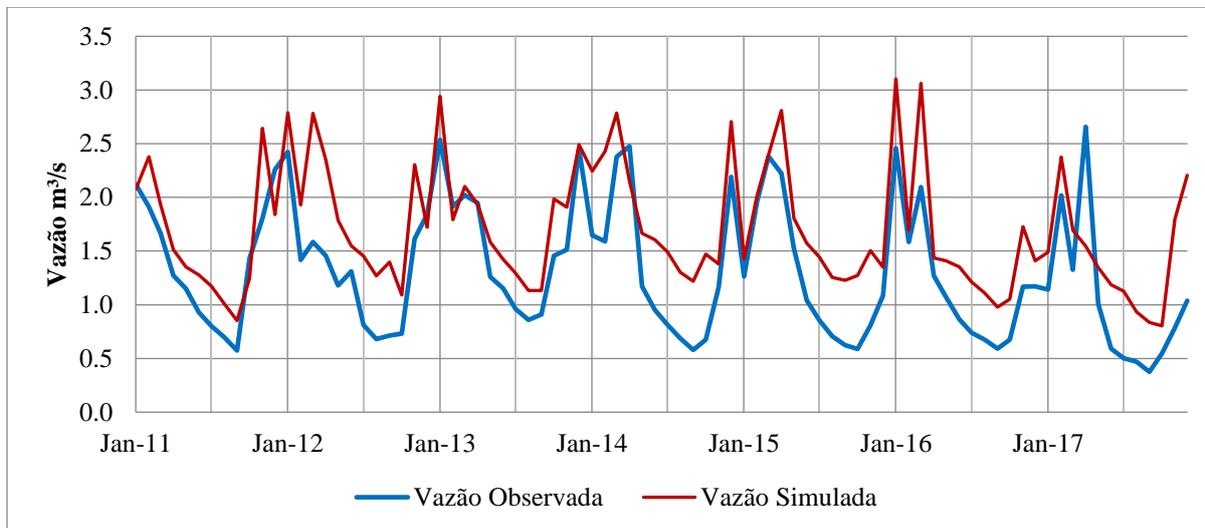


Figura 5.32 - Hidrogramas observado e simulado na verificação da sub-bacia do ribeirão das Pedras.

A verificação do modelo na sub-bacia do ribeirão das Pedras atingiu como resultado o valor de $NS = 0,54$ e o valor $R^2 = 0,70$.

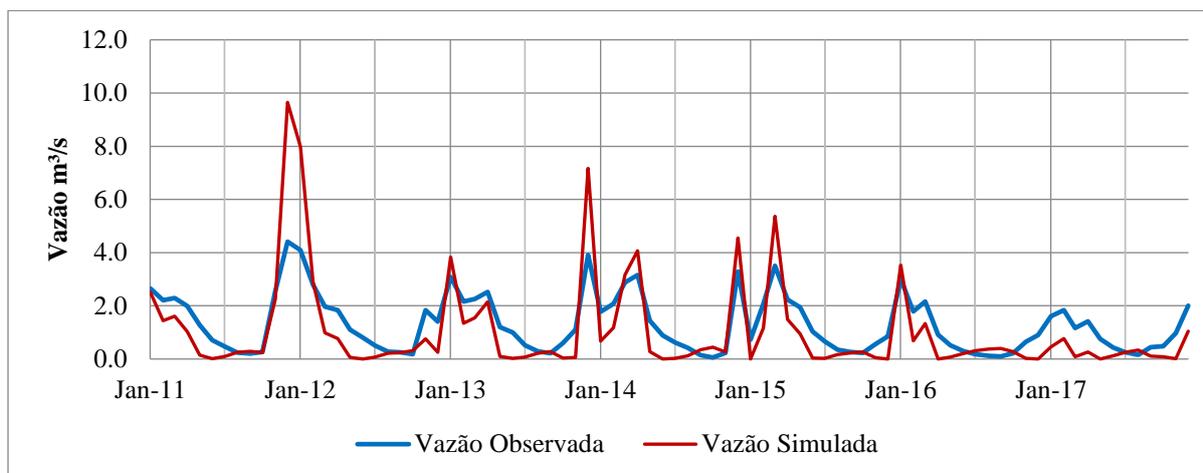


Figura 5.33 - Hidrogramas observado e simulado na verificação da sub-bacia do ribeirão Rodeador.

A verificação do modelo na sub-bacia do ribeirão Rodeador alcançou como resultado o valor de NS = -0,15 e o valor $R^2 = 0,72$.

A partir da análise estatística dos valores obtidos do coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE), percebe-se que a verificação das sub-bacias apresentam respostas consideradas insatisfatórias para as sub-bacias do córrego Chapadinha e do ribeirão Rodeador, possuindo valores negativos. As sub-bacias do córrego Capão Comprido, córrego Olaria e rio Descoberto possuem valores de NSE positivos, mas menores que 0,5, podendo ser considerado um resultado razoável. Apenas a sub-bacia do ribeirão das Pedras obteve um valor de $NSE \geq 0,5$ e considerado satisfatório na análise. Em relação ao coeficiente de determinação (R^2), os valores são considerados adequados para a verificação do modelo, somente a SBCC obteve valor menor que 0,5.

Observa-se nos hidrogramas simulados pelo modelo que as vazões de pico e de recessão foram superestimadas principalmente na SBCC, SBCO, SBRD e SBRP, vários motivos podem estar relacionados a esse fenômeno, tais como a variabilidade climática e consequentemente a diminuição da vazão dos mananciais, devido principalmente a menor quantidade de chuva que ocorreu na região a partir dos anos de 2014 e 2015.

A Tabela 5.13 apresenta a síntese da avaliação estatística dos resultados da verificação obtidos das sub-bacias em estudo.

Tabela 5.13 - Avaliação estatística na verificação do modelo.

Função Objetivo	SBCC	SBCCC	SBCO	SBRD	SBRP	SBRR
NSE	-0,10	0,21	0,17	0,15	0,54	-0,15
R²	0,40	0,53	0,55	0,78	0,70	0,72

Efetuuou-se o cálculo da média da vazão observada e a média da vazão simulada com os parâmetros calibrados para o período de verificação, com o objetivo de analisar e comparar os resultados, a Tabela 5.14 apresenta os valores obtidos.

Tabela 5.14 – Vazão média observada e simulada na verificação do modelo.

Vazão (m³/s)	SBCC	SBCCC	SBCO	SBRD	SBRP	SBRR
Vazão média observada	0,24	0,25	0,21	1,54	1,30	1,30
Vazão média simulada	0,38	0,35	0,31	2,51	1,70	1,03

5.6 Simulação de Cenários

Com o intuito de analisar as mudanças que ocorrerão nas sub-bacias em estudo, especificamente no deflúvio, foram construídos cenários de uso e ocupação das sub-bacias. A base de dados utilizada nas simulações do SWAT fora atualizada com os valores alcançados na etapa de calibração dos parâmetros do modelo para cada sub-bacia. Os dados climáticos utilizados na simulação dos cenários são provenientes do período de janeiro de 2000 a dezembro de 2005 e os resultados obtidos estão expostos nos itens a seguir.

5.6.1 Cenário Preservado

O uso e ocupação das sub-bacias em estudo foi alterado para se tornar o mais semelhante possível à época em que não havia nenhuma ocupação humana. Dessa forma, os usos definidos como mata de galeria, campo limpo, área alagáveis/campos de murundus foram mantidas como atuais, os demais usos presentes nas sub-bacias foram alterados para área preservada/cerrado, gerando um cenário sem nenhuma interferência antrópica. As Figuras 5.34; 5.35; 5.36; 5.37; 5.38 e 5.39 apresentam o uso preservado para a sub-bacias, facilitando a comparação com o uso e ocupação atual presente no item 5.1.2.

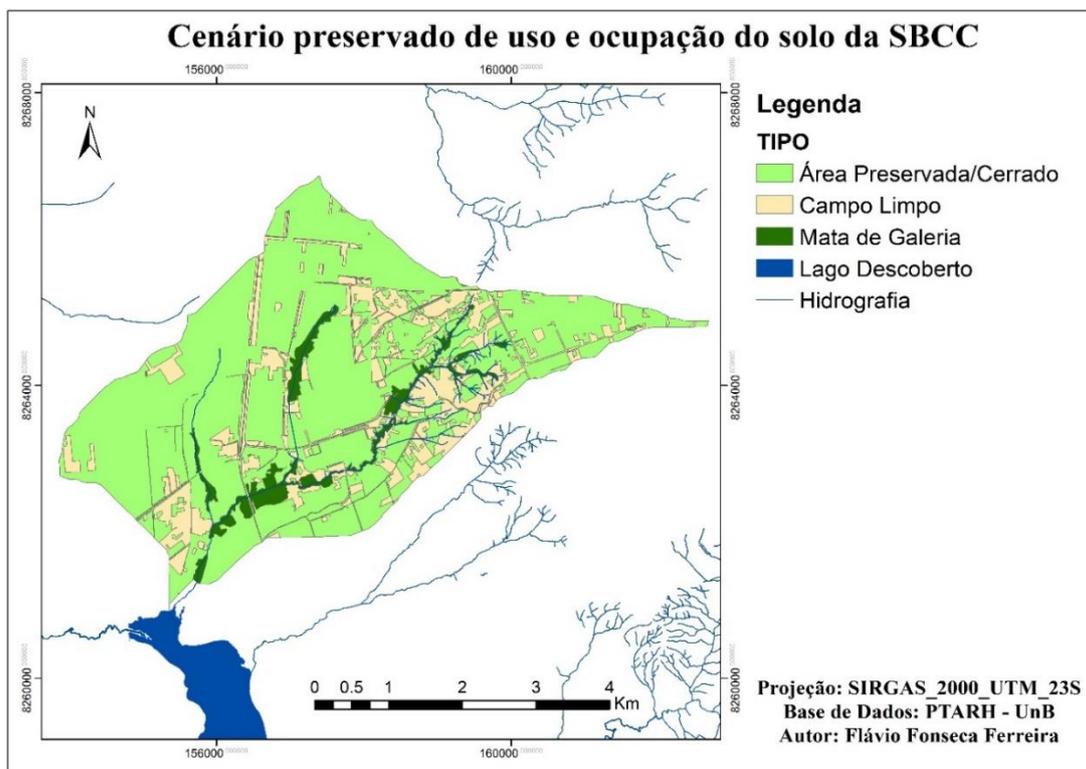


Figura 5.34 – Cenário preservado de uso e ocupação do solo da sub-bacia do córrego Chapadinha.

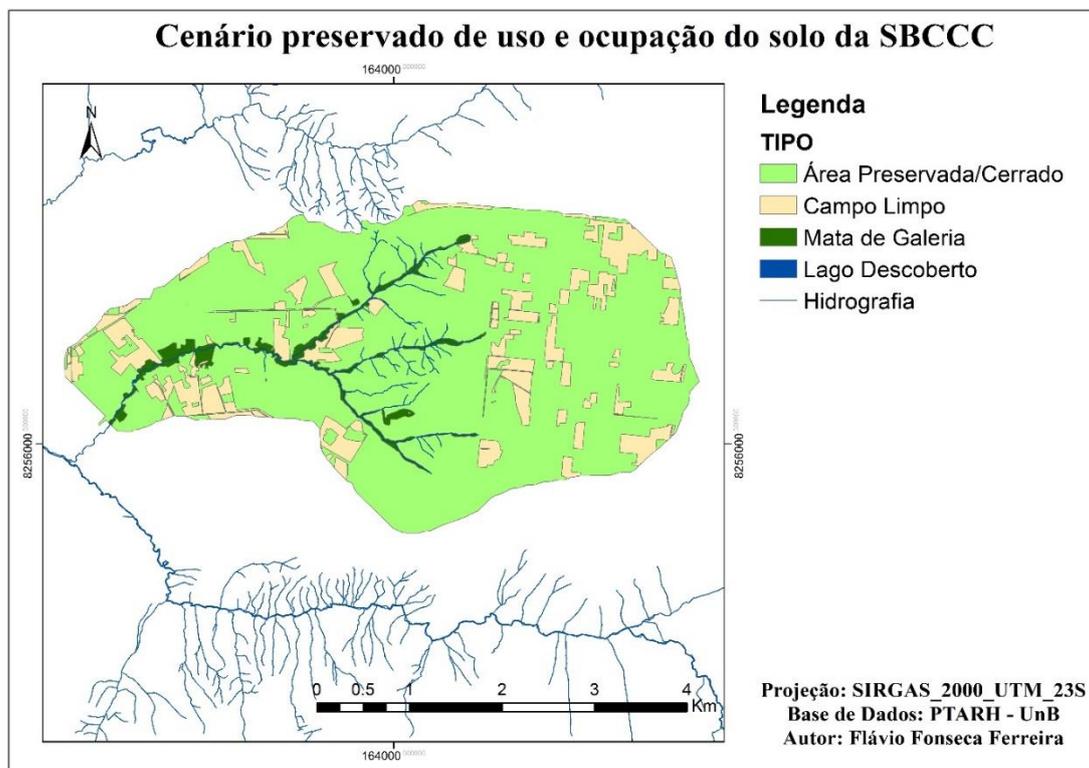


Figura 5.35 – Cenário preservado de uso e ocupação do solo da sub-bacia do córrego Capão Comprido.

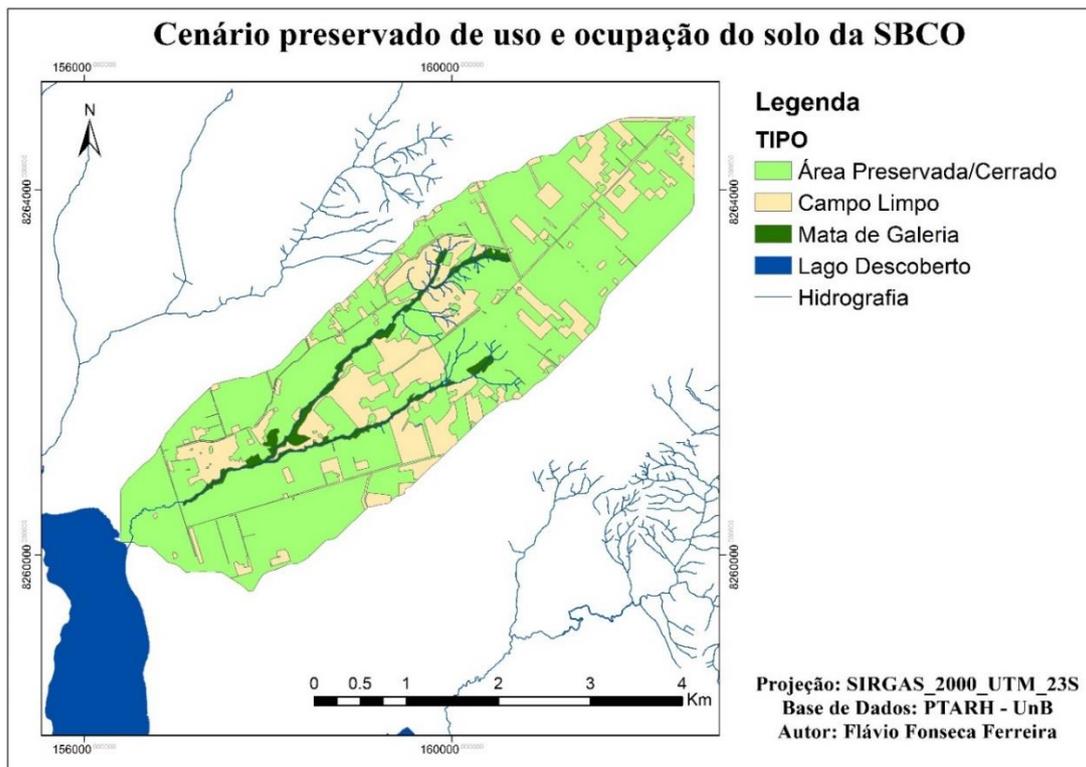


Figura 5.36 – Cenário preservado de uso e ocupação do solo da sub-bacia do córrego Olaria.

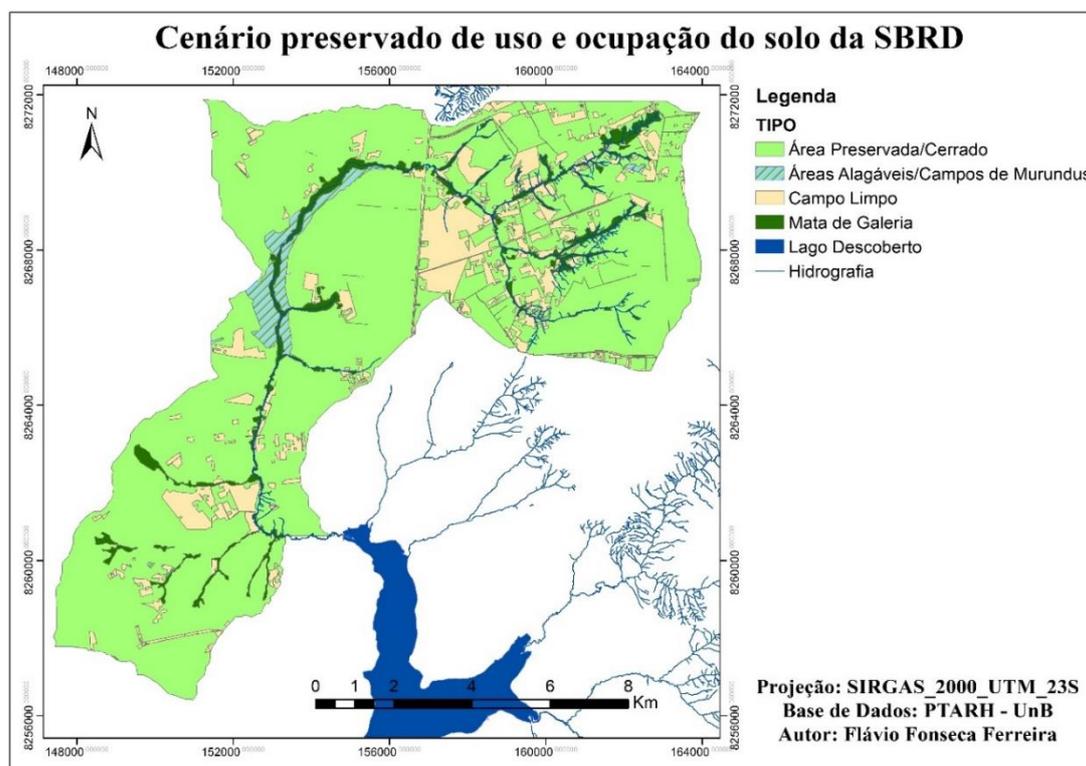


Figura 5.37 – Cenário preservado de uso e ocupação do solo da sub-bacia do rio Descoberto.

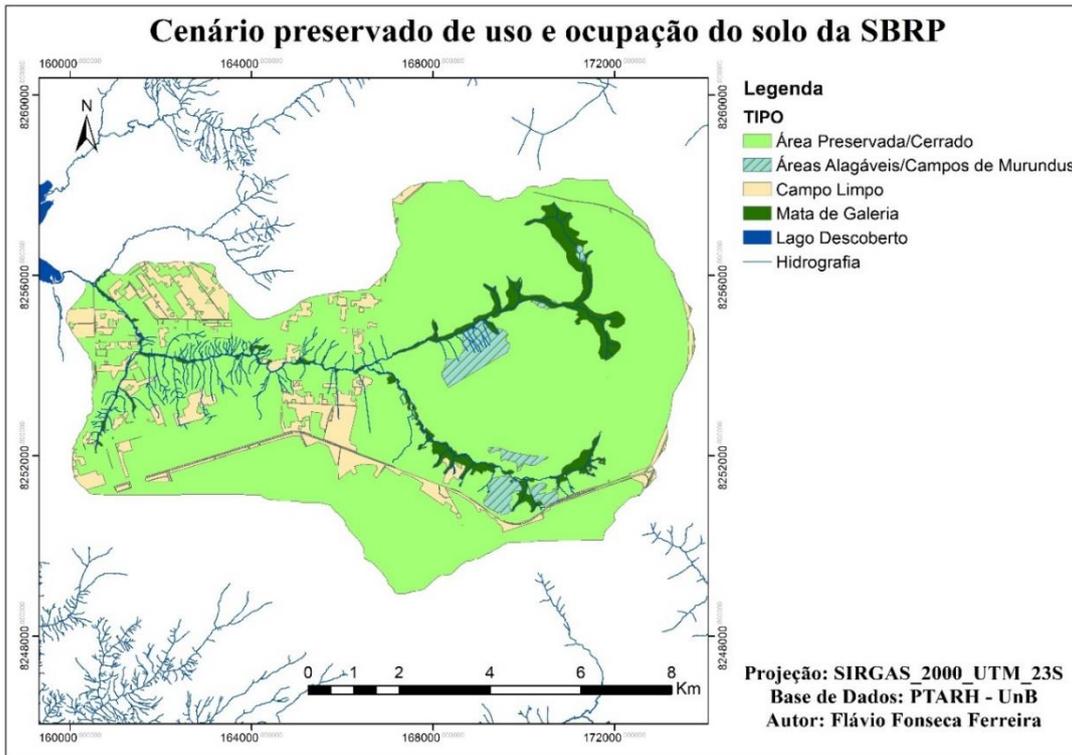


Figura 5.38 – Cenário preservado de uso e ocupação do solo da sub-bacia do ribeirão das Pedras.

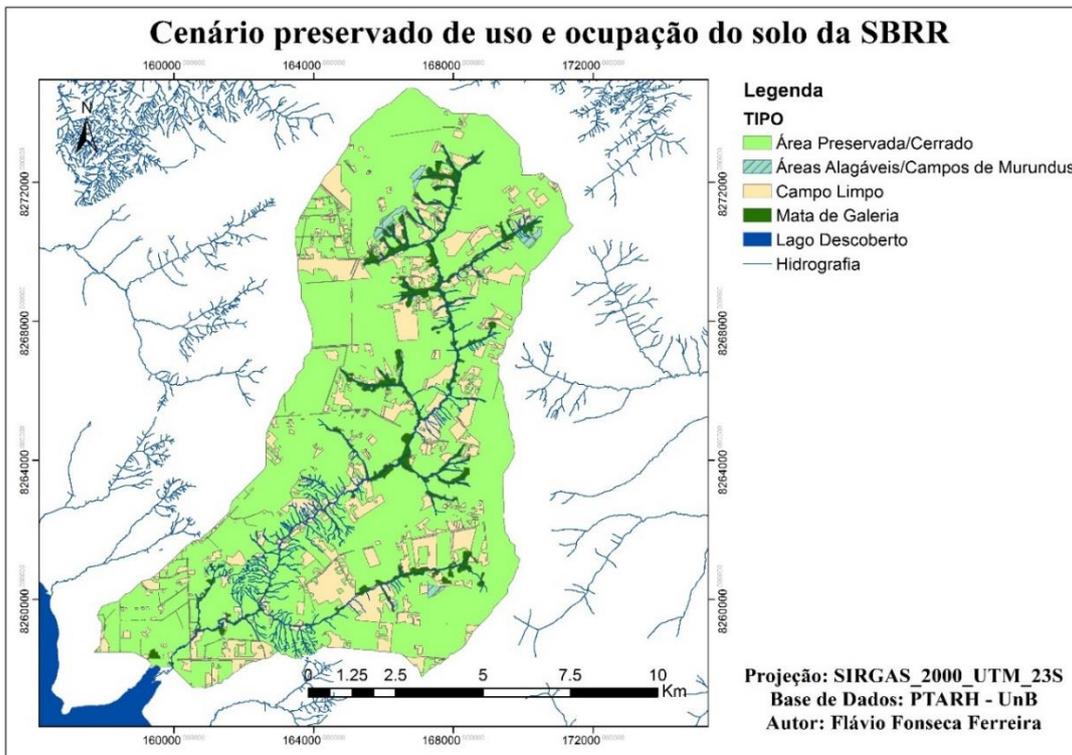


Figura 5.39 – Cenário preservado de uso e ocupação do solo da sub-bacia do ribeirão Rodeador.

A partir da modificação do uso e ocupação das sub-bacias, foi elaborado a Tabela 5.15 que apresenta os respectivos percentuais de ocupação de cada uso do solo em cada sub-bacia de estudo para o cenário preservado proposto.

Tabela 5.15 – Percentuais do usos e ocupação do solo das sub-bacias para o cenário preservado.

Usos	Sub-bacias					
	SBCC	SBCCC	SBCO	SBRD	SBRP	SBRR
Área Preservadas/Cerrado	76,3%	81,4%	73%	80,6%	84,1%	77,5%
Área Alagável/Campo de Murundus	-	-	0,6%	2,2%	2,6%	-
Campo Limpo	18,9%	15,4%	23,0%	12,2%	8,5%	17,1%
Mata de Galeria	4,8%	3,2%	3,4%	5,0%	4,8%	5,4%

5.6.2 Cenário Antrópico

A análise das sub-bacias foi efetuada para um cenário de uso do solo bastante consolidada pela ação humana, isto é, em estágio avançado de ocupação, com o crescimento de zonas urbanas e áreas agrícolas.

Adotou-se as seguintes alterações para a criação do cenário, as áreas urbanas consideradas de baixa e média densidade foram alteradas para alta densidade, e regiões próximas aos limites urbanos foram consideradas pertencentes a esse tipo de uso, expandindo seu raio de influência. Vias não pavimentadas foram transformadas em vias pavimentadas, áreas vegetadas e de reflorestamento de Eucalipto foram alteradas para solo exposto, áreas de reflorestamento de Pinus e campo limpo transformadas em pastagem, e as áreas preservadas com presença de vegetação nativa (cerrado) foram convertidas em áreas de agricultura do tipo anual. Os demais usos foram mantidos como se encontram no estado atual.

As Figuras 5.40; 5.41; 5.42; 5.43; 5.44 e 5.45 retratam os usos das sub-bacias em estudo para a condição do cenário antrópico proposto.

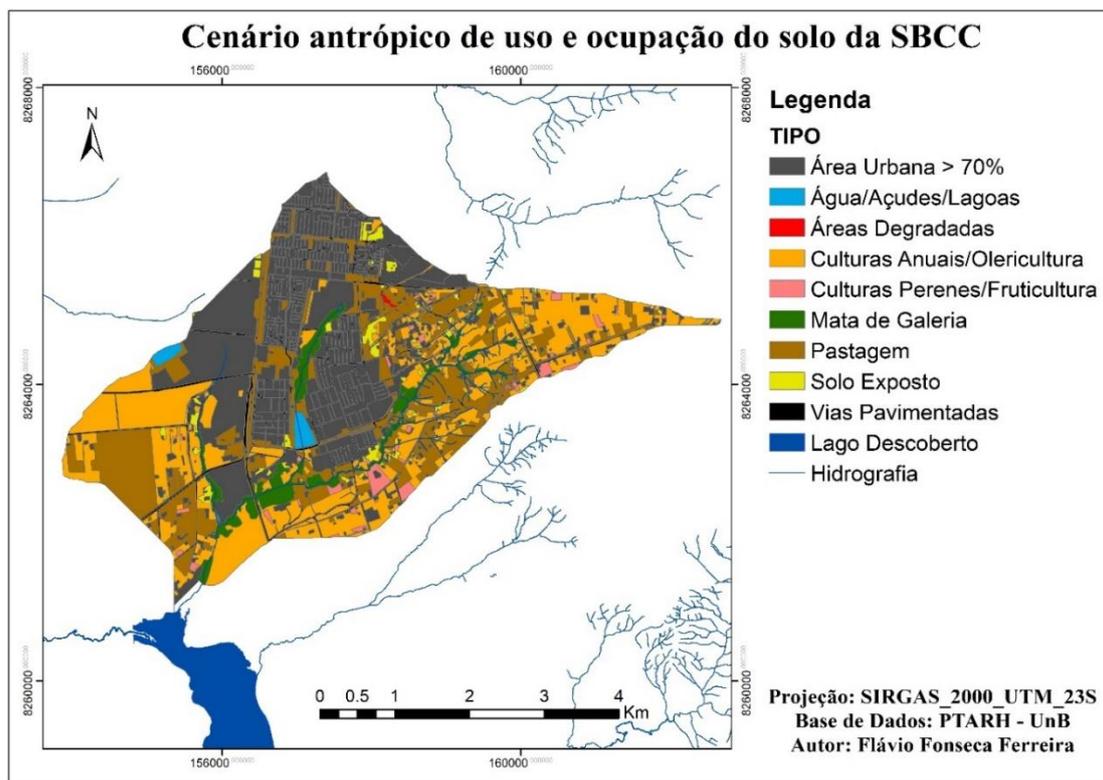


Figura 5.40 – Cenário antrópico de uso e ocupação do solo da sub-bacia do córrego Chapadinha.

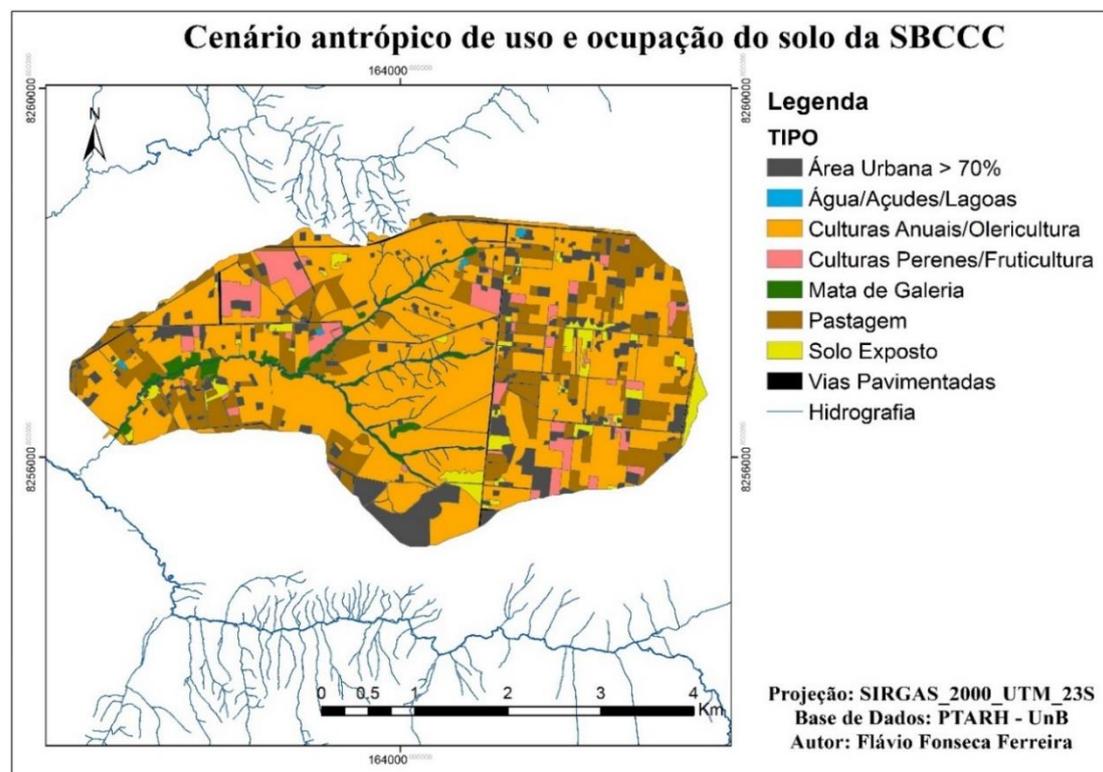


Figura 5.41 – Cenário antrópico de uso e ocupação do solo da sub-bacia da sub-bacia do córrego Capão Comprido.

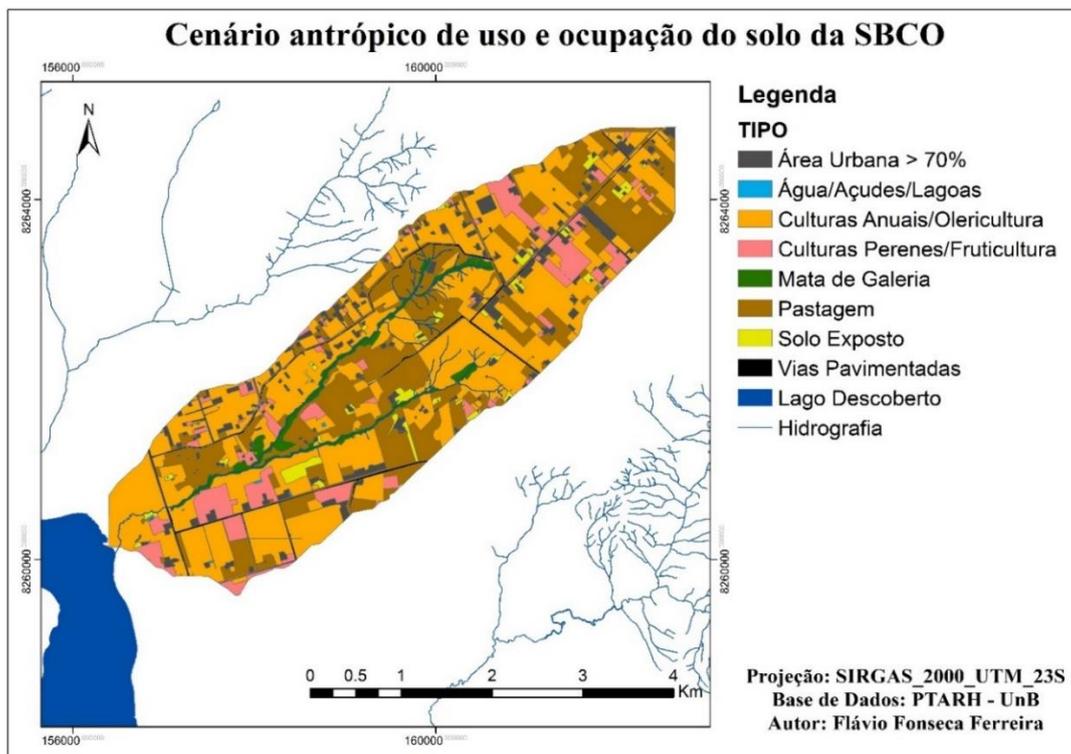


Figura 5.42 – Cenário antrópico de uso e ocupação do solo da sub-bacia da sub-bacia do córrego Olaria..

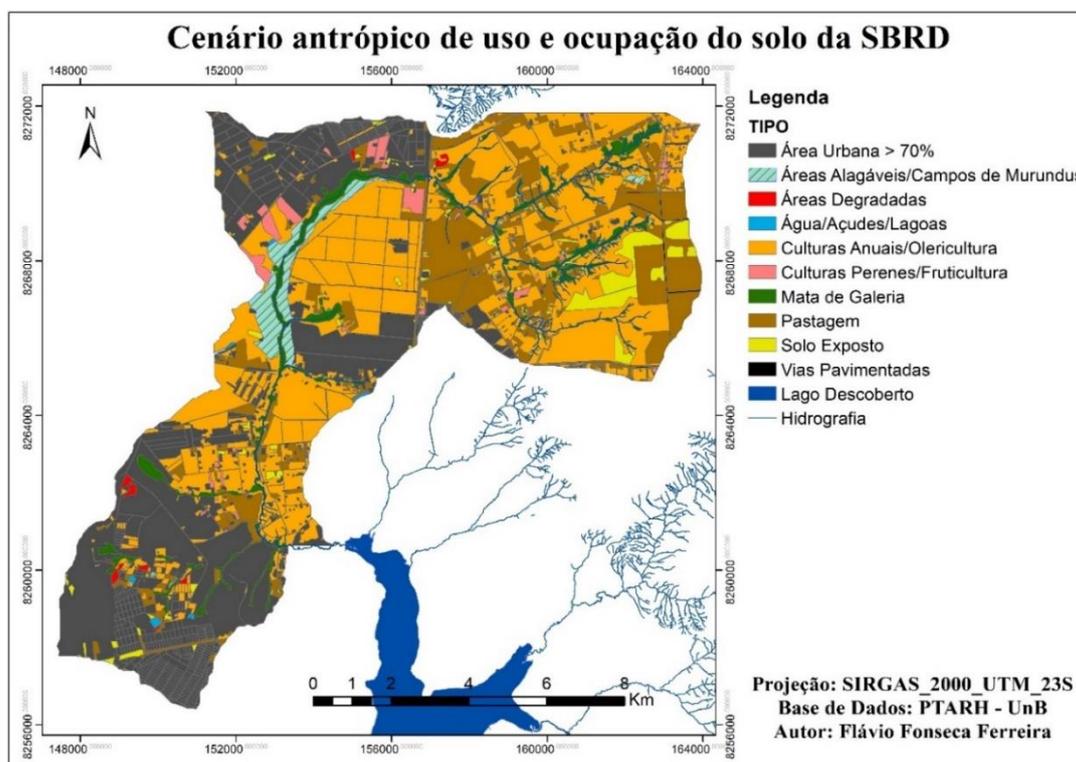


Figura 5.43 – Cenário antrópico de uso e ocupação do solo da sub-bacia da sub-bacia do rio Descoberto.

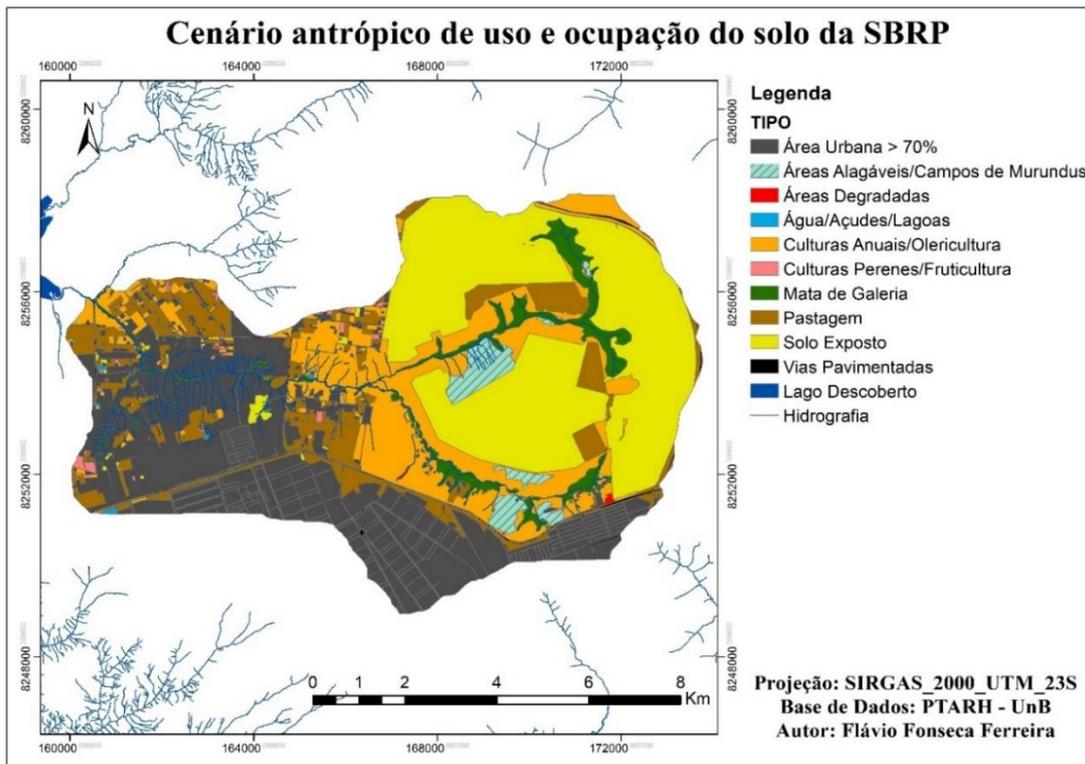


Figura 5.44 – Cenário antrópico de uso e ocupação do solo da sub-bacia da sub-bacia do ribeirão das Pedras.

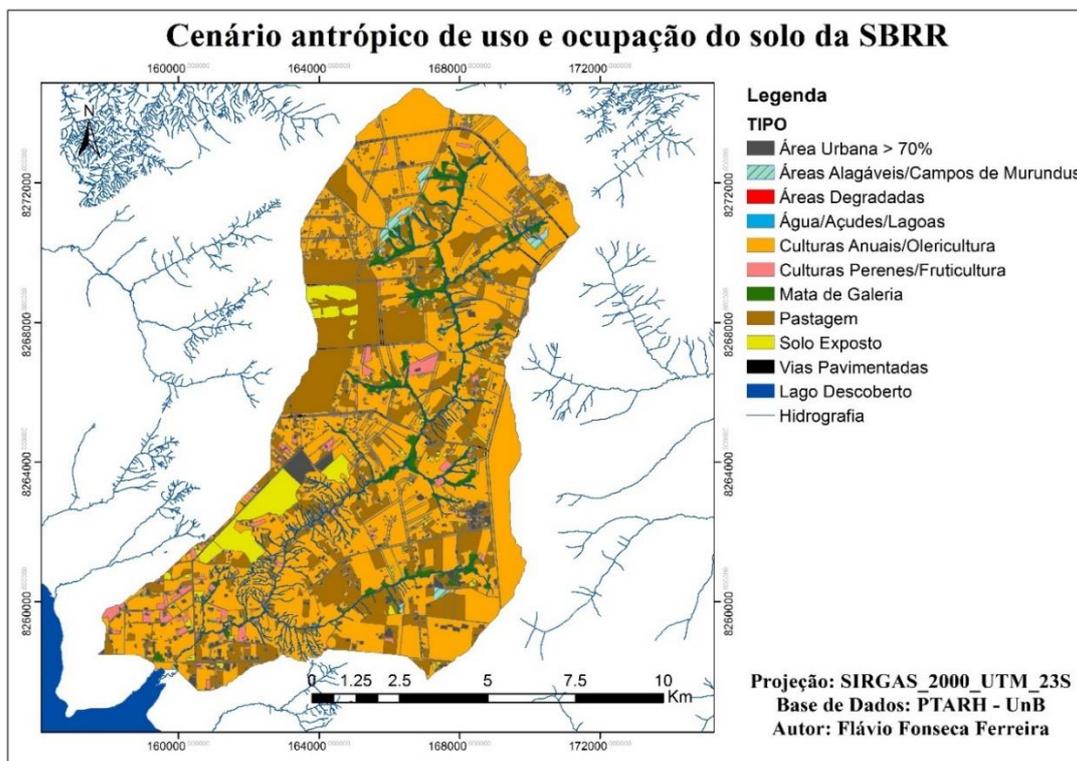


Figura 5.45 – Cenário antrópico de uso e ocupação do solo da sub-bacia da sub-bacia do ribeirão Rodeador.

Com base na alteração do uso e ocupação das sub-bacias, foi elaborado a Tabela 5.16 que apresenta os respectivos percentuais de ocupação e uso do solo em cada sub-bacia de estudo para o cenário antrópico proposto.

Tabela 5.16 – Percentuais do usos e ocupação do solo das sub-bacias para o cenário antrópico.

Usos	Sub-bacias					
	SBCC	SBCCC	SBCO	SBRD	SBRP	SBRR
Área Urbana de Alta Densidade	38,2%	7,7%	6,7%	42,5%	33,4%	3,6%
Área Alagável/Campo de Murundus	-	-	0,6%	2,2%	2,6%	-
Áreas Degradadas	0,2%	-	-	0,4%	0,1%	0,2%
Água/Açudes/Lagoas	1,0%	0,2%	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%
Culturas Anuais/Olericultura	17%	59,6%	49,5%	24,3%	13,0%	58,1
Culturas Perenes/Fruticultura	1,6%	5,1%	8,7%	2,0%	0,5%	2,2%
Mata de Galeria	4,8%	3,2%	3,4%	5,0%	4,8%	5,4%
Pastagem	22,8%	17,0%	25%	16,8%	11,1%	22,6%
Solo Exposto	3,9%	3,4%	3,0%	3,5%	31,1%	4,7%
Vias Pavimentadas	10,5%	3,8%	3,0%	3,1%	3,3%	3,1%

5.6.3 Hidrogramas gerados na simulação dos cenários

Baseado na retificação do uso e ocupação do solo de cada sub-bacia em estudo, foi realizada simulações no SWAT com os cenários estabelecidos, as Figuras 5.46; 5.47; 5.48; 5.49; 5.50 e 5.51 apresentam os resultados gerados pelo modelo, comparando a o comportamento do deflúvio para a vazão observada, simulada para o uso atual, para o cenário antrópico e para o cenário preservado.

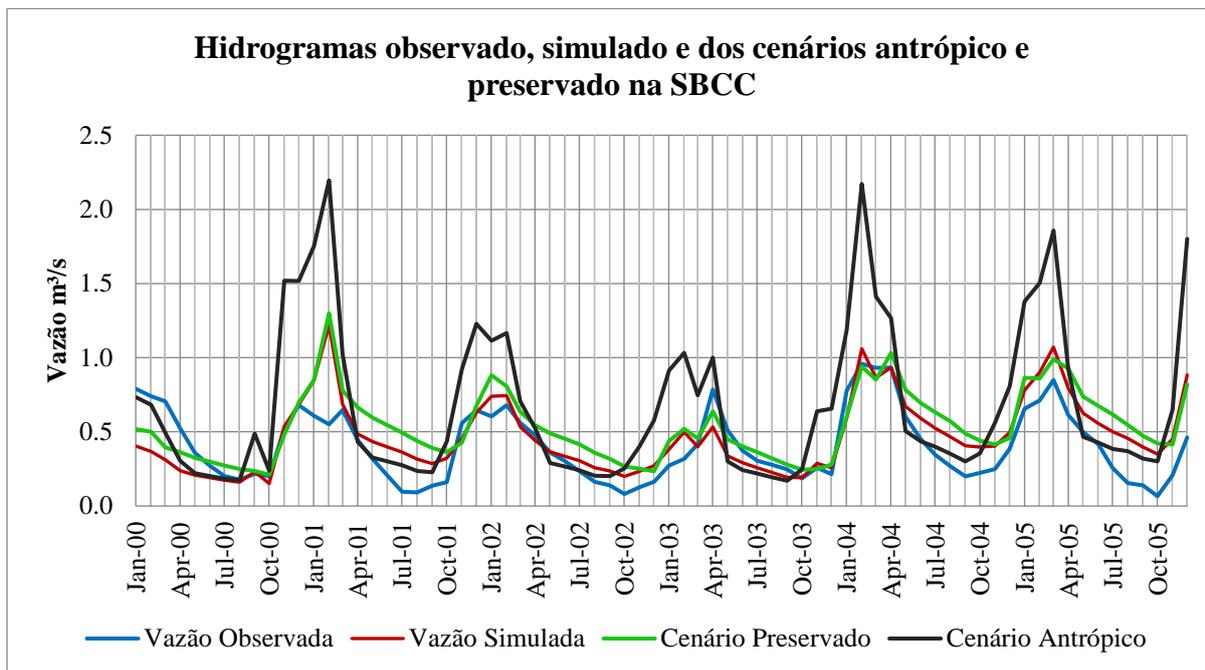


Figura 5.46 - Hidrogramas observado, simulado, cenário antrópico e preservado da sub-bacia do córrego Chapadinha (SBCC).

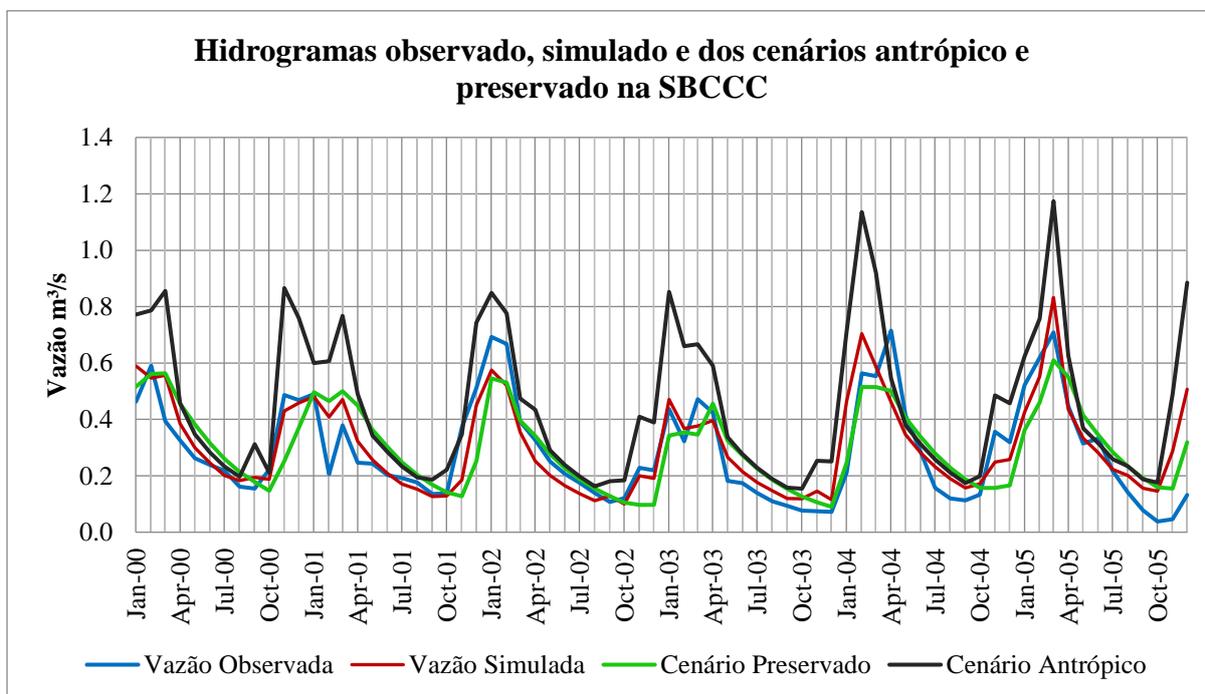


Figura 5.47 - Hidrogramas observado, simulado, cenário antrópico e preservado da sub-bacia do córrego Capão Comprido (SBCCC).

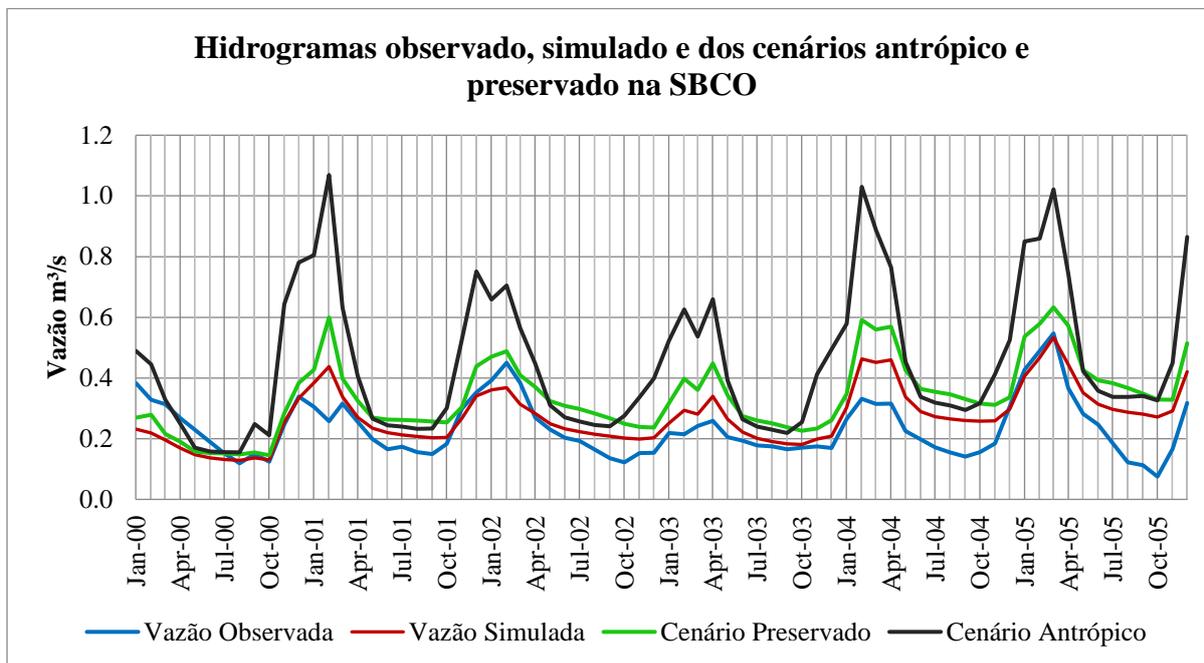


Figura 5.48 - Hidrogramas observado, simulado, cenário antrópico e preservado da sub-bacia do córrego Olaria (SBCO).

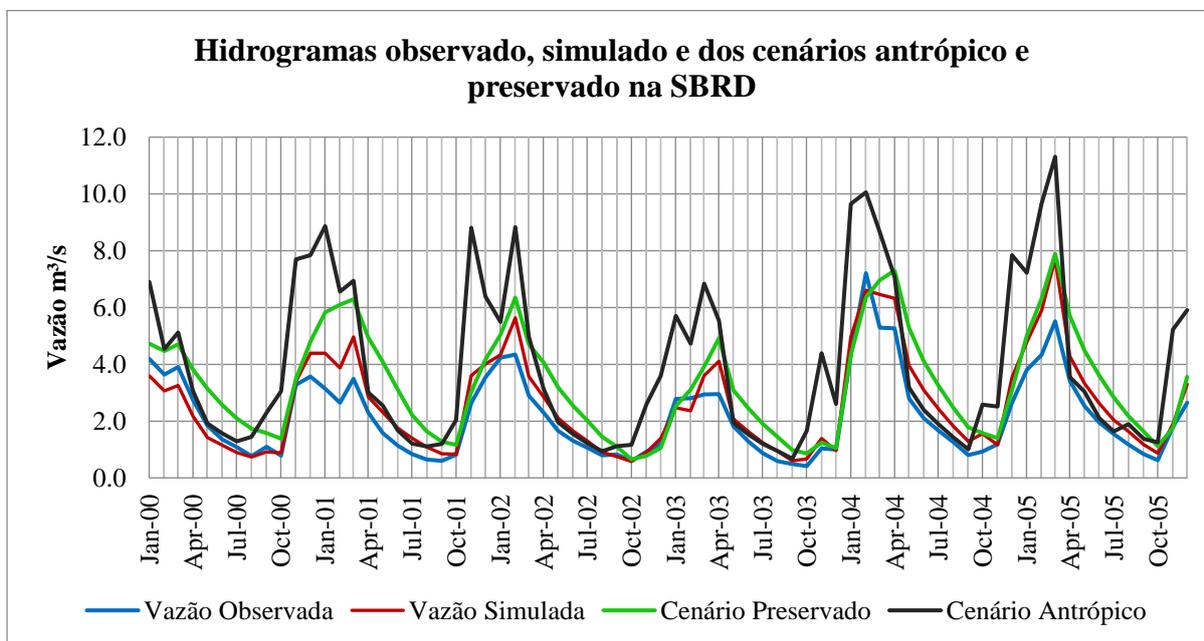


Figura 5.49 - Hidrogramas observado, simulado, cenário antrópico e preservado da sub-bacia do ribeirão Descoberto (SBRD).

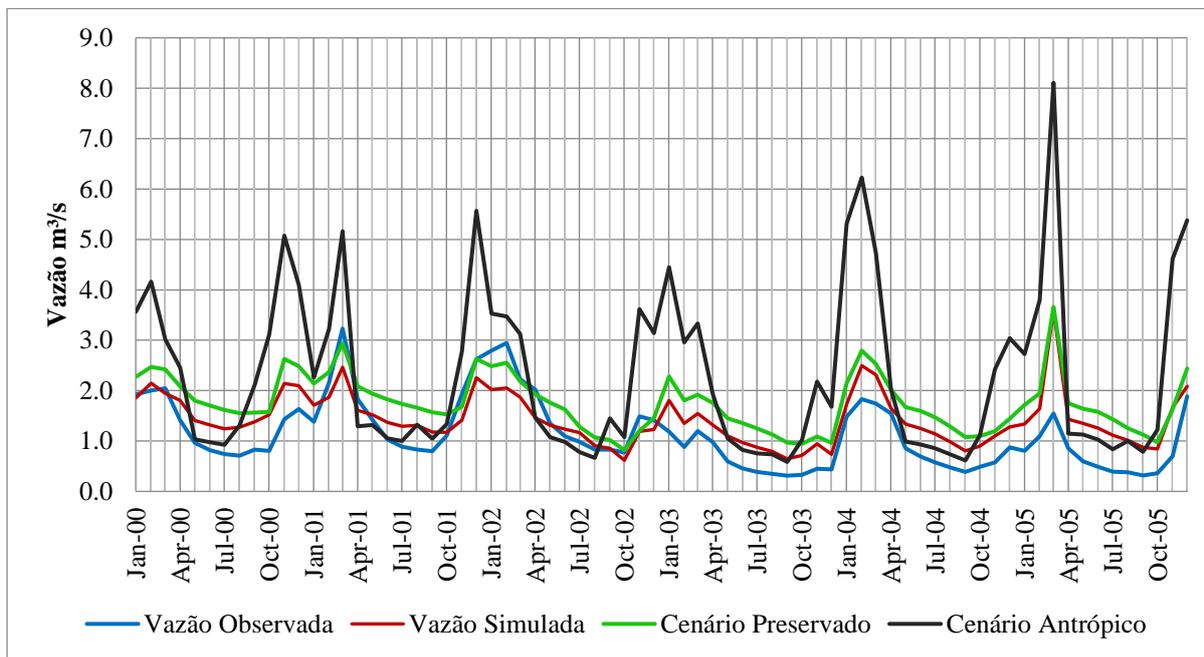


Figura 5.50 - Hidrogramas observado, simulado, cenário antrópico e preservado da sub-bacia da sub-bacia do ribeirão das Pedras (SBRP).

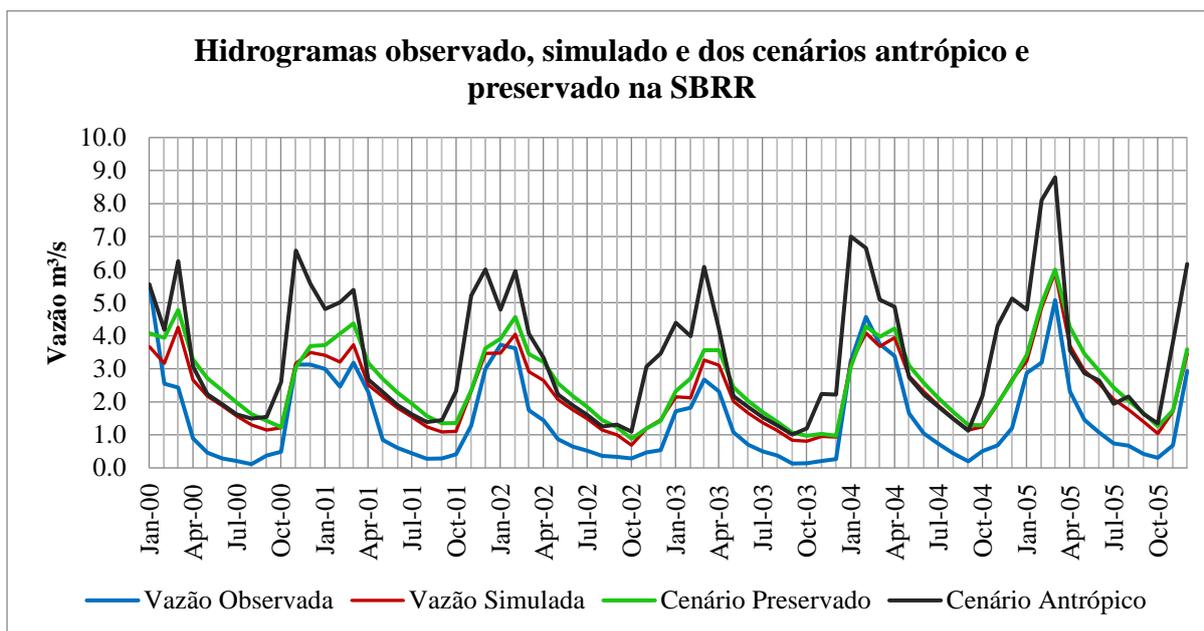


Figura 5.51 - Hidrogramas observado, simulado, cenário antrópico e preservado da sub-bacia do ribeirão Rodeador (SBRR).

A partir da simulação para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2005, foi avaliado as respostas estatísticas comparando os resultados da modelagem para o cenário de uso e ocupação atual, apreciando a confiabilidade do modelo na estimativa da vazão nas sub-bacias que integram a pesquisa.

A Tabela 5.17 apresenta a síntese da avaliação estatística dos resultados obtidos na modelagem das sub-bacias em estudo, no período do ano 2000 a 2005 e que também foi considerada para a modelagem dos cenários.

Tabela 5.17 - Avaliação estatística da modelagem das sub-bacias para o período de 2000 a 2005.

Função Objetivo	SBCC	SBCCC	SBCO	SBRD	SBRP	SBRR
NSE	0,61	0,81	0,69	0,84	0,61	0,56
R²	0,53	0,49	0,51	0,90	0,57	0,83

O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) mostra estatisticamente que os resultados simulados pelo modelo foram adequados, possuindo valores de $NSE \geq 0,5$ e coeficiente de determinação $R^2 > 0,5$. Tais valores alcançados na função objetivo indicam que a representação da vazão pelo modelo é consistente e considerado próximo ao que se observa na realidade.

Com base na simulação dos cenários aplicados no estudo, apresenta-se na sequência os resultados do cálculo da vazão média gerada pelos diferentes cenários, da modelagem para o uso do solo atual e da vazão observada nas sub-bacias para o período do ano 2000 a 2005. A Tabela 5.18 apresenta os valores atingidos para a vazão média.

Tabela 5.18 – Vazão média observada, simulada e para os cenários antrópico e preservado.

Vazão (m³/s)	SBCC	SBCCC	SBCO	SBRD	SBRP	SBRR
Vazão média observada	0,41	0,29	0,24	2,20	1,14	1,49
Vazão média simulada	0,47	0,31	0,27	2,62	1,43	2,31
Vazão cenário antrópico	0,67	0,45	0,45	3,94	2,30	3,35
Vazão cenário preservado	0,54	0,30	0,34	3,29	1,75	2,61

A partir dos dados obtidos na simulação das vazões médias mensais para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2005, observa-se que a vazão simulada para o período se encontra próxima aos valores de vazão média mensal observada para as sub-bacias. Para o cenário antrópico percebe-se um aumento considerável nos valores de vazão nos eventos de cheia, indicando que a impermeabilização e retirada da cobertura do solo podem aumentar o escoamento superficial.

5.6.4 Balanço Hídrico

Após a etapa de modelagem dos cenários para cada sub-bacia em estudo, o modelo SWAT fornece uma série de resultados relacionados ao ciclo hidrológico proveniente do período de simulação do ano 2000 a 2005. Os valores relacionados ao ciclo hidrológico simulado nas sub-bacias para cada cenário foram resumidos e apresentados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Valores relacionados ao ciclo hidrológico simulado nas sub-bacias.

Cenário Atual						
Variável (mm)	SBCC	SBCCC	SBCO	SBRD	SBRP	SBRR
Precipitação	1707,7	1380	1680,3	1617,9	1429,2	1418,9
Evapotranspiração	671,5	628,5	564,2	533,5	571,5	492,4
Escoamento Superficial	171,96	94,29	49,44	122,87	146,26	68,73
Escoamento Subsuperficial	47,07	118,57	194,37	151,93	44,1	136,58
Percolação	741,76	540,34	791,56	813,1	638	721,94
Capilaridade	102,1	66,81	63,53	128,72	138,96	98,04
Descarga ao Aquífero	603,96	480,37	133,17	647,08	475,28	588,57
Recarga ao Aquífero Profundo	30,41	17,29	577,84	40,66	31,9	36,1
Cenário Preservado						
Variável (mm)	SBCC	SBCCC	SBCO	SBRD	SBRP	SBRR
Precipitação	1707,7	1388	1680,1	1630	1429,2	1405,3
Evapotranspiração	739,8	786,5	695,1	606	623,5	579,3
Escoamento Superficial	23,5	12,82	21,16	24,62	18,03	15,53
Escoamento Subsuperficial	124,12	115,23	179,61	166,32	111,28	145,82
Percolação	748,54	472,85	707,46	835,4	648,26	665,79
Capilaridade	98,57	66,93	63,6	131,5	153,83	98,97
Descarga Aquífero	637,72	457,78	105,12	694,25	525,81	534,08
Recarga Aquífero Profundo	29,94	15,13	516,45	41,77	32,41	33,29
Cenário Antrópico						
Variável (mm)	SBCC	SBCCC	SBCO	SBRD	SBRP	SBRR
Precipitação	1707,7	1387,9	1680,1	1629,9	1429,2	1405,3
Evapotranspiração	563,1	500,4	453,8	450,1	445,7	378
Escoamento Superficial	515,2	274,96	349,98	527,49	499,72	295,65
Escoamento Subsuperficial	90,12	125,47	166,08	118,86	67,99	130,85
Percolação	485,22	487,02	640,84	530,16	396,16	597,36
Capilaridade	97,75	66,81	63,53	125,21	153,65	98,84
Descarga ao Aquífero	385,66	471,43	95,87	434,45	315,63	475,05
Recarga ao Aquífero Profundo	19,41	15,58	467,81	26,51	19,81	29,87

Pode-se inferir que houve diferenças significativas entre alguns componentes do balanço hídrico nos diferentes cenários, mesmo sendo a mesma área, mesmos dados climáticos, mesmo tipo de solo e mesma declividade, o uso do solo pode ser considerado o fator de maior influência nesse balanço.

Comparando-se os valores de evapotranspiração do cenário atual para o cenário preservado ocorreu um aumento médio de 16%, enquanto para o cenário antrópico observou-se uma diminuição média nas sub-bacias de 19%.

Para os valores do escoamento superficial, verificou-se uma diminuição para o cenário preservado em relação ao uso atual do solo no percentual médio de 82%, esse fato pode ter sido ocasionado pela maior presença de áreas permeáveis e com vegetação, influenciando no processo de infiltração e conseqüentemente mudando a dinâmica de escoamento superficial. Para o cenário de uso antrópico em relação à ocupação de uso atual, o escoamento superficial aumentou na ordem de 277%, com esse dado pode-se aferir que a maior presença de solo exposto e áreas impermeáveis como as das zonas urbanas tem grande efeito na alteração do volume de escoamento.

Em relação a descarga do aquífero ocorreu pouca alteração do cenário atual para o cenário preservado, no qual houve um aumento médio de 1%, no entanto esse dado deve ser analisado com ponderação, pois há muitas outras variáveis em análise que podem ter interferido no estudo e não representar de forma consistente determinados processo hidrológicos. Para o cenário antrópico comparado com o cenário atual ocorreu uma diminuição média percentual de 25%.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A simulação inicial sem calibração gerou resultados superestimados quando comparados aos dados observados em todas as sub-bacia em estudo, onde os picos de vazão tiveram comportamento muito superiores aos da realidade. Além disso, os resultados nos períodos de recessão no período de análise foram subestimados em alguns casos, como para as sub-bacias do córrego Chapadinha, córrego Capão Comprido e córrego Olaria. Com isso, observou-se que é de grande importância a realização da calibração para o processo de aderência dos resultados.

O modelo SWAT mostrou-se apropriado a simular o regime mensal de vazões para as sub-bacias do rio Descoberto, ribeirão das Pedras e ribeirão Rodeador, com os valores das funções objetivo utilizadas no estudo superando os limites mínimos exigidos pela literatura para que a calibração fosse considerada satisfatória. Para as demais sub-bacias como a do córrego Chapadinha, córrego Capão Comprido e córrego Olaria, apesar de não atingir valores tão satisfatórios em relação aos coeficientes de Nash- Sutcliffe, se mantiveram bem próximos, com valores de $NSE > 0,3$, indicando a correspondência com os dados observados para o período.

Ressalta-se que muitos fatores contribuem para a consolidação desses tais resultados, dentre eles estão a boa descrição da área de estudo, a utilização de dados que descrevam as características preponderantes na bacia e que possibilitam a interpretação dos processos que nela ocorrem. Além disso, utilização dos parâmetros do modelo SWAT calibrados para as sub-bacias na simulação em nível mensal de outras bacias hidrográficas com características similares se mostrou viável, o que possibilita a simulação em bacias hidrográficas não monitoradas.

Em todas as sub-bacias estudadas notou-se que a contribuição da água subterrânea é fundamental para a manutenção da vazão nos corpos hídricos, tal fato é indicado pela grande influência dos parâmetros relacionados a esse fenômeno, como a condutividade hidráulica saturada do solo (SOL_K), a densidade aparente do solo (SOL_BD) e a capacidade de água disponível no solo (SOL_AWC). O uso dos recursos hídricos deve levar em consideração esse aspecto, principalmente nos períodos de seca, em que a quantidade de água presente na rede hídrica é controlada em maior peso por processos hidrológicos no solo e subterrâneo. Conforme as dificuldades observadas, verifica-se a necessidade de aprofundar os estudos sobre o efeito

dos parâmetros do componente de escoamento de base, e eventualmente alterar a forma de cálculo e estimativa desse componente.

O modelo SWAT mostrou a sensibilidade da bacia às mudanças dos cenários de uso do solo, permitindo modelar o regime de vazão, tornando possível avaliar quantitativamente o quanto essas modificações feitas nos usos de solo influenciaram no escoamento superficial, além de permitir estimar as mudanças nos parâmetros do balanço hídrico na bacia estudada. O estudo evidenciou a influência do uso do solo nas variáveis hidrológicas, com o aumento da geração do escoamento superficial e diminuição da evapotranspiração para o cenário antrópico, enquanto para o cenário preservado ocorreu aumento da evapotranspiração e diminuição do escoamento superficial nas sub-bacias em estudo.

Recomenda-se para pesquisas futuras que o estudo deve ser abranger a calibração dos parâmetros que influenciam no cálculo de sedimentos e nutrientes (Nitrogênio e Fósforo), e a realização de simulação hidrológica na geração de possíveis cenários, com o intuito de analisar de forma qualitativa os impactos causados pelas atividades antrópicas nas bacias hidrográficas em estudo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K.C.; YANG, J.; MXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. (2007) **Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT**. *Journal of Hydrology*, v. 333, p. 413– 430.

ABBASPOUR, K.C. (2013) **SWAT-CUP2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual**. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology*, Duebendorf, Switzerland, 103 p.

ADASA. Agência Reguladora de Águas Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (2012). **Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal**. Revisão e atualização. Relatório Final, Volume I. Diagnóstico. Brasília, DF.

ADASA. **Produto 2 – Estudo Técnico sobre a disponibilidade do recurso hídrico na bacia do alto Descoberto**. Projeto de Cooperação Técnica Internacional (UNESCO), Modelagem Hidrológica da Bacia do Alto Descoberto, 2017, p. 199.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: resultados por estado**. 2010. v. 2. 92 pg. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/downloads/atlas/Resumo%20Executivo/Atlas%20Brasil%20-%20Volume%202%20-%20Resultados%20por%20Estado.pdf>>. Acesso em: 02 abr. 2018.

AGUIAR, L. M. **Integração entre curvas de permanência de qualidade de água e modelagem hidrológica como suporte à gestão de recursos hídricos - Estudo de caso da bacia hidrográfica do ribeirão Rodeador/DF**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 69. 2016.

ALENCAR, D. B. S.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. **Influência da precipitação no escoamento superficial em uma microbacia hidrográfica do Distrito Federal**. *Engenharia Agrícola*, v.26, p.103-112, 2006

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, American Water Works Association, Water Environment Federation -APHA; AWWA e WEF-(1995). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Washington D.C.: American Public Health Association, 20a ed. 4500-PA.

ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B. NEITSCH, S. L. (2012). **Input/Output Documentation: version 2012**. Texas Water Resources Institute, Temple, TX.

ARROIO, J. P. O. **Aprimoramento das rotinas e parâmetros dos processos hidrológicos do modelo computacional Soil and Water Assessment Tool – SWAT**. 2016. 180 f. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2016.

BALBINO, F, T. **Análise integrada de dados físico-químicos das drenagens da porção nordeste do Lago Descoberto, na bacia hidrográfica do Descoberto**. Monografia de Graduação. Universidade Católica de Brasília, Brasília, DF, 2017. 146p.

BICALHO, C. C. **Estudo do transporte de sedimentos em suspensão na Bacia do Rio Descoberto**. Universidade de Brasília. 2006.

BONUMA, N.B; REICHERT, J.M; MINELLA, J.P; JACOMET, L; OLIVEIRA, A; RODRIGUES, M.F. **Simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural no sul do Brasil**. In: XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Fortaleza, 2009.

BRAGA, B. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2ª ed. São Paulo: Editora Pearson Prentice Hall, 2005. 336 p.

BRASIL. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Informe 2012** (p. 215). Brasília: Agência Nacional de Águas. 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. **Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal: Caracterização sócio-econômica do DF e das Demandas e uso dos Recursos Hídricos Superficiais**. Brasília: UnB / MMA. Relatório Técnico - Volume 2, 1998. 103 p.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica Catarinense. RBRH - **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 53-64. 2016.

BRITO, F. A. **Gestão Ambiental por resultados para a APA Bacia do Rio Descoberto**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Brasília, DF. 1999, 110p.

CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. **Produtos e Serviços - Água e Esgotos no Distrito Federal**. Disponível em: <<http://www.caesb.df.gov.br/>>. Acesso em 27 abr. 2018.

CAESB. **Plano Diretor de Água e Esgotos do Distrito Federal**. CAESB, 2006.

CAESB. **SIÁGUA-Sinopse do Abastecimento de Água do Distrito Federal**. Brasília-DF, 2014.

CAESB. **Água, o Cidadão e a Caesb**. Distrito Federal: Texto, 2014.

CAESB. **Sistemas de abastecimento**. 2013. Disponível em: <<http://www.caesb.df.gov.br/agua/sistemas-de-abastecimento.html>>. Acesso em: 3 abr. 2018

CARVALHO, F. H. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro**. Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2014, 154p. Dissertação de Mestrado.

CHAVES, A. A. A.; LACERDA, M. P. C.; KATO, E.; GOEDERT, W. J.; RAMOS, M. L. G. **Uso das terras da parte norte da bacia do rio Descoberto**, Distrito Federal, Brasil. *Bragantia*, v.69, p.711-718, 2010.

CHOW, V.T. **Hydrology and it's development**. 1964. In: Chow, V.T. *Handbook of applied hydrology: a Compendium of Water-resources Technology*. New York: McGrawhill Book. 1400p.

CHU, T. W.; SHIRMOHAMMADI, H.; SADEGHI, A. **Evaluation of the SWAT model's sediment and nutrient components in the Piedmont physiographic region of Maryland**. *Transactions of the American Society Agricultural Engineers* v.47(5), p. 1523-1538. 2004.

CODEPLAN. **Distrito Federal em Síntese – Informações socioeconômicas e geográficas**, 2012/ Companhia de Planejamento do Distrito Federal (Codeplan). Brasília: Codeplan, 2012. 78p.

COSTA, G. A. **Conflitos Socioambientais na Dinâmica do Uso do Território na Sub-Bacia do Córrego Chapadinha/Brazlândia/DF**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Geografia, Brasília, DF, 2015. 159 p.

DERISIO, J.C. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB, 1992, 210 p.

DISTRITO FEDERAL. Governo de Brasília. Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Distrito Federal – SEMA. **Plano Integrado de Enfrentamento à Crise Hídrica**, 2017, 67p.

DISTRITO FEDERAL. **Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal**. Editores: Luiz Fernando Orsini Yazaki, Marco Helano Fernandes Montenegro, Jeferson da Costa. – Brasília, DF: Adasa, UNESCO. 2018. 329p.

EMATER. **Informações Agropecuárias do Distrito Federal - 2017**. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural/DF. Secretaria de Estado de Agricultura, Abastecimento e Desenvolvimento Rural - SEAGRI-DF. Disponível em: <<http://www.emater.df.gov.br>>. Acesso em: 15 de outubro de 2018.

EMBRAPA. **Avaliação da Suscetibilidade Natural à erosão dos solos da bacia do Olaria-DF**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados. Planaltina - DF, 2001, 32p.

EMÍDIO, Z. P. O. **Impacto do balanço hídrico em diferentes tipos de solo**: comparação entre dados de radar-pluviômetro e análise de tendência da chuva média em área agrícola. 2008. 147 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2008.

FALCOMER, Julio. **Alterações do uso da terra na bacia do ribeirão Rodeador – Área de proteção ambiental (APA) da bacia do rio Descoberto-DF/GO, no período de 1965 a 1991**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Ecologia, Brasília, DF. 1994, 39p.

FERNANDES, S. C. (2005). “**Avaliação de imagens de satélite de alta e muito alta resolução espacial para a discriminação de classes de uso e ocupação do solo**: aplicação ao caso da sub-bacia do córrego Capão Comprido no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília - DF. 2005, 124p.

FERREIRA, V., BORGES, M., ANJOS, E. **Determinação dos Aportes Totais e Carga por Unidade de Área de Nitrogênio e Fósforo com Base na Caracterização do Uso do Solo nas Bacias dos Lagos Descoberto e Santa Maria - Brasília/DF**. Actq Limnol. Brasil, IV, 163–174. 1992.

FERRIGO, S.; MINOTTI, R.; ROIG, H.L.; KOIDE S. **Avaliação da utilização de diferentes métodos na calibração automatizada do modelo SWAT** In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, 2013.

FERRIGO, S. **Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática** – estudo de caso da bacia do Lago Descoberto – DF. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

FIM, B. M. (2018). **Análises quantitativa e qualitativa das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador/DF para avaliação das cargas de poluição.** Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 110p.

GDF. In: ZEE-DF - **Zoneamento ecológico e econômico do Distrito Federal. Subproduto 3.1 –Relatório do Meio Físico e Biótico.** Brasília, 2014.

GREEN, C. H.; GRIENSVEN, A. V. (2008) **Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds.** *Environmental Modelling and Software*, v. 23, p. 422-434.

GRIGG, N. S. "**Integrated water resources management: balancing views and improving practice**", *Water International*, 33(3), 279-292. 2008.

KARMANN, I. **O ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica.** In: Wilson Teixeira; Thomas Rich Fairchild; Maria Cristina Motta de Toledo; Fabio Taioli. (Org.). *Decifrando a Terra*. 1a ed. São Paulo: Oficina de textos. p. 113-138. 2000.

LIMA, W. P. **Impacto Ambiental do Eucalipto.** 2ª ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1996. 301 p.

LIMA, J. B. M. **Estudo de redes de monitoramento de qualidade de água superficiais – o caso da Bacia do Rio Descoberto.** Universidade de Brasília. 2004.

MACEDO, M. JUNIOR. **A influência do uso, da ocupação e da conservação do solo na qualidade da água de abastecimento: o caso da bacia hidrográfica do lago Descoberto.** Universidade Católica de Brasília. 2004.

MANOEL-FILHO, J. Ocorrência das Águas Subterrâneas. In: **Hidrogeologia Conceitos e Aplicações.** Feitosa, F.A.C. & Manoel, Filho J. (Coord.). Fortaleza – CE. CPRM/REFO, LABHID-UFPE. p.13-32. 2000.

MERTEN, G. H., MINELLA, J. P. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, Porto Alegre, v. 3, n. 4, 2002. 33-38 pp.

MEINZER, E. O. **Physics of the Earth**, pt. 9, Hydrology. New York: Dover Pub. p. 712. 1949.

MINOTI, R. **Abordagens Qualitativa e Quantitativa de Micro-bacias Hidrográficas e Áreas Alagáveis de um Compartimento do Médio Mogi-Superior/SP**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo. 231p. 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília. 135p. 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Plano de Manejo da APA Bacia do Rio Descoberto**. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBIO, 2014. 313p. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-planos-de-manejo/apa_bacia_do_rio_descoberto_pm_encartes_12_e_3.pdf>. Acesso em: 16 de outubro de 2018.

MONSALVE-HERRERA, D. J. **Integração de modelos de quantidade e qualidade da água para avaliação de cargas contaminantes em afluentes de mananciais de abastecimento**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH. DM 146/2013, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 127p. 2013.

MORIASI D. N.; ARNOLD J. G; VAN LIEW M. W; BINGER R. L; HARMEL R. D; VEITH T. (2007) **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**. Trans ASABE, v. 50, p. 885-900.

NASCIMENTO, A. C.; CAMPANA, N. A.; EID, N. J. **“Reconstituição de vazões mínimas. Estudo de caso: Bacia do Córrego Capão Comprido”** in: *I Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste, Brasília - DF, 2000*.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.R.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.J. **Soil and water assessment tool**: theoretical documentation – version 2005. SERVICE, G-S.A.W.R.L. – A. R, Texas USA, p. 525, 2005.

NEITSCH, S. L.; WILLIAMS, J. R.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R. **Soil and water assessment tool - Theoretical documentation version 2009**. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2009. 654p.

NIJBOER, R. C; VERDONSCHOT, P. F. **Variable selection for modelling effects of eutrophication on stream and river ecosystems**. Ecological Modelling, 177(1-2), 17-39. 2004.

NUNES, G. **Aplicação do modelo SWAT no estudo hidrológico e de qualidade de água da Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá - DF**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2016.

NUNES, J. F. **O modelo LUCIS e o planejamento territorial da bacia do Alto Rio Descoberto**. 123 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

NUNES, J. F. **Classificação e Análise do Uso e Ocupação do Solo da Bacia do Alto Descoberto DF / GO**. Universidade de Brasília. 2011.

PASSOS, A. L. L. **Seleção de melhores parâmetros na definição de um índice de qualidade de água para o Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado em Ciências Ambientais, Universidade de Brasília, Brasília, 2018. 74 p.

REATTO, A.; MARTINS, E. S.; CARDOSO, E. A.; SPERA, S. T.; CARVALHO JÚNIOR; O. A. C.; SILVA, A. V.; FARIAS, M. F. R. **Levantamento de reconhecimento de solos de alta intensidade do alto curso do Rio Descoberto, DF/GO, escala 1:100000**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 92. EMBRAPA Cerrados, Distrito Federal, 2003.

REATTO, A. et al. (2003). **Relação entre as Classes de Solos e as Principais Fitofisionomias do Alto Curso do Rio Descoberto, Distrito Federal e Goiás**. Planaltina – DF, Embrapa Cerrados.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas - relatório técnico parcial. MCT/INPE. São José dos Campos: INPE, 2000. 60p.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EESC/USP, 1998. 840 p.

SARMENTO, L. (2010) **Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas**. Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH. TD – 07/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 1-241.

SALLES, L.A. **Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pípiripau**. 2012. 114 f. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília/DF. 2012.

SEDUH (Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação). **Shapefile Hidrografia - Cursos Água CRH 2016**. Disponível em: <<https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/geoservicos/>>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2019.

SILVA, Thales T. S.; FILHO, Getúlio E. P. C.; VASCONCELOS, Eliakim L.; COSTA, Jeferson da. “**Caracterização ambiental da bacia do ribeirão das Pedras: Entendendo a dinâmica ambiental**”. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Segurança hídrica e desenvolvimento sustentável: Desafios do conhecimento e da gestão. Brasília –DF, novembro de 2015.

SILVA, I. R. O. **Aplicação do Método das Cargas Máximas Totais Diárias de Nutrientes na Bacia do Córrego Rodeador - DF**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 79p. 2016.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: Tucci, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Segunda edição. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH. p. 35-51. 2009.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: TUCCI, C. E.M (Org). **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4 ed. 6 reimp. Porto Alegre: Ed. Universidade UFRGS – ABRH. 2014. 941p.

TOMAZ, P. **Poluição Difusa**. São Paulo: Navegar Editora, 2006.

TUCCI, C. E. M. (1998) **Modelos Hidrológicos**. 1a ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, p. 669.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4a Edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS. ABRH. 943 p. 2009.

UBERTI, A. A. A.; BACIC, I. L. Z.; PANICHI, J. A. V.; LAUS NETO, J. A.; MOSER, J. M.; PUNDEK, M.; CARRIÃO, S. L. (1991) **Metodologia para classificação da aptidão de uso das terras do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: Empasc: Emater (SC), 19 p.

UNESCO. **Vegetação no Distrito Federal: tempo e espaço**. 2ª edição. p. 80. Brasília. 2002.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 130p. 2009.

UZEIKA, T.; MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P.G.; MORO, M. Use of the swat model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. **Revista Brasileira Ciência do Solo**. vol.36, n.2 ISSN 0100-0683. 558-566. 2012.

VITO, M. D. E. **Avaliação do risco de contaminação de mananciais hídricos para o abastecimento: o caso da bacia da barragem do descoberto**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília. 181p. 2007.

VON SPERLING, M. V. “**Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos – princípios do tratamento biológico de águas residuárias**”. V.1, 2ª edição. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. 240 p. 1995.