



Universidade de Brasília – UnB  
Instituto de Geociências - IG

**AVALIAÇÃO DO MODELO SWAT NA SIMULAÇÃO DA  
VAZÃO EM BACIA AGRÍCOLA DO CERRADO  
INTENSAMENTE MONITORADA.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Nº52**

**Kássia Batista de Castro**

**Orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig**

**Co-orientador: Dr. Jorge Enoch Furquim Werneck Lima**

Brasília – DF

2013



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**AVALIAÇÃO DO MODELO SWAT NA SIMULAÇÃO DA VAZÃO EM  
BACIA AGRÍCOLA DO CERRADO INTENSAMENTE MONITORADA**

**Kássia Batista de Castro**

**Orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig**

**Co-Orientador: Jorge Enoch Furquim Werneck Lima**

Dissertação de Mestrado apresentada à Banca Examinadora do Instituto de Geociências Aplicadas (Geoprocessamento e Análise Ambiental) da Universidade de Brasília, como exigência para obtenção do título de mestre em Geociências.

**Brasília-DF**

**Março 2013**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**Instituto de Geociências**

**AVALIAÇÃO DO MODELO SWAT NA SIMULAÇÃO DA VAZÃO EM  
BACIA AGRÍCOLA DO CERRADO INTENSAMENTE MONITORADA**

**Kássia Batista de Castro**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Henrique Llacer Roig**

**Presidente**

---

**Prof. Dr. Luciano Soares Cunha**

*Membro Interno*

---

**Prof. Dr. Abelardo Antônio de A. Montenegro**

*Membro Externo*

**Brasília, março de 2013**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as oportunidades e objetivos alcançados. Aos meus pais, Adio e Rose, por todas as lições, valores repassados, afeto e apoio em todos os momentos da minha vida e aos meus irmãos Adisson e André e primas Selma e Geise, pelo suporte familiar.

Ao meu orientador, Dr. Henrique Roig, primeiramente pela oportunidade, por ter me recebido de braços abertos e principalmente por todo o conhecimento repassado, pela enorme paciência e tempo dedicados ao aprimoramento do trabalho e ao meu de forma particular, e por acreditar na realização desse projeto. E ao Dr. Jorge Werneck por disponibilizar os dados necessários a essa pesquisa, e mais que isso, por fazer parte deste trabalho como colaborador e incentivador, por todo apoio e ensinamentos e pelo tempo despendido para o avanço da pesquisa.

A CAPES pelo auxílio financeiro durante o período do mestrado e aos projetos Estudos Hidrológicos e Sedimentológicos em Bacias Experimentais e Representativas do Semiárido e do Cerrado e Geração de Valores de Referência de Parâmetros do Modelo SWAT Adequados ao Bioma Cerrado, aos quais esse trabalho se insere.

A Dr. Adriana Reatto e a Marisa Prado, pelos ensinamentos e primordialmente por acreditar e investir no meu crescimento intelectual, criando a possibilidade de novos caminhos. Ao Dr. Éder Martins pela grande contribuição científica agregada ao meu conhecimento durante o período da iniciação acadêmica e pelas oportunidades dadas, que possibilitaram avanços futuros, e aos amigos Denilson Passo e Vinícius Vasconcelos por todo o aprendizado adquirido.

Aos professores e colegas do grupo de modelagem hidrológica do PTARH, que possibilitaram grande troca de conhecimento. Aos professores do Instituto de Geociências e aos colegas que adquiri ao longo desses dois anos, principalmente ao Paulo Henrique, Gervásio, Carlos, Maria Elisa, e de forma singular ao Leandro, Jimena e Sara por toda a ajuda prestada em sanar dúvidas e dificuldades no decorrer do processo de modelar.

Aos colegas de trabalho da Gerência de Geotecnologia da Conab, primordialmente ao Tarsis Piffer pela compreensão durante o período de finalização do mestrado. E por fim, aos meus grandes amigos Alane Fontes, Carolina Pereira, Karen Castro, Fernanda Souza e Thiago Santana por todos os momentos de descontração, pelas experiências compartilhadas e por todo o carinho. E de forma especial para a amiga inseparável, Larissa Ane, presente em todos os momentos, obrigada pela amizade sincera, apoio e companheirismo.

*Aos meus pais, por toda dedicação e por acreditarem e me ensinarem que o estudo é capaz de vencer muitos obstáculos.*

*"Nossa recompensa se encontra no esforço e no resultado. Um esforço total é uma vitória completa." (Mahatma Gandhi).*

# **AVALIAÇÃO DO MODELO SWAT NA SIMULAÇÃO DA VAZÃO EM BACIA AGRÍCOLA DO CERRADO INTENSAMENTE MONITORADA**

**Autor: Kássia Batista de Castro**

**Orientador: Henrique Llacer Roig**

**Co-Orientador: Jorge Enoch Furquim Werneck Lima**

## **RESUMO**

A modelagem hidrológica é uma importante ferramenta de apoio a gestão e a tomada de decisões sobre o uso do solo e da água. O objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicabilidade do modelo SWAT em uma bacia agrícola típica do bioma cerrado, intensamente monitorada. A bacia selecionada para este estudo, foi a bacia do Alto Rio Jardim, com área aproximada de 105 km<sup>2</sup>, situada na porção sudeste do Distrito Federal. Trata-se de uma bacia experimental, com grande volume de dados medidos, que está inserida na Rede cooperativa de Bacias Experimentais formada pela UFPE, UFRPE, UFAL, UFS, UnB, EMBRAPA Cerrados financiada pela Chamada Pública MCT/FINEP/CT-Hidro 01/2010. A série histórica (julho de 2006 a junho de 2008) utilizada neste trabalho compreende os dados de uma estação pluviográfica, quatro estações pluviográficas localizadas dentro da bacia e uma estação climatológica distante cerca de 30 km da bacia. Foram também utilizados dados de solos levantados na área. As etapas metodológicas consistiram na: 1 - seleção e carga dos dados no banco de dados do SWAT; 2- definição das sub-bacias e das Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's); 3 - análise de sensibilidade; 4 - calibração do modelo; e 5 - Simulação, validação do modelo e análise estatística. Foram geradas cerca de 6 sub-bacias e 628 HRU's. A simulação hidrológica através do modelo SWAT não conseguiu representar a realidade de forma satisfatória sem a calibração dos parâmetros mais sensíveis no modelo. A análise de sensibilidade identificou 10 parâmetros em consonância com outros estudos realizados no Brasil para séries diárias. A calibração foi realizada para um ano de dados diários, onde os testes de eficiência de Nash e Sutcliffe (ENS) e o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), corresponderam a 0,60 e 0,66, valores superiores aos considerados satisfatórios para a calibração diária, deste modo a calibração do modelo apresentou boa representatividade da vazão diária da bacia. Já para a validação os valores de ENS e R<sup>2</sup> foram respectivamente de -0,8 e 0,66, não sendo satisfatórios. De uma forma geral, apesar de algumas limitações nos resultados obtidos, principalmente na fase de validação do modelo, dependendo da informação necessária para a gestão dos recursos hídricos, após a calibração, o SWAT demonstrou ser uma ferramenta passível de utilização para a simulação de vazões diárias na bacia do alto rio Jardim.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica, bacia experimental, dados medidos.

# **EVALUATION OF THE SWAT MODEL IN THE OUTPUT OF AN INTENSIVELY MONITORED AGRICULTURAL WATERSHED OF CERRADO**

**Autor: Kássia Batista de Castro**

**Orientador: Henrique Llacer Roig**

**Co-Orientador: Jorge Enoch Furquim Werneck Lima**

## **ABSTRACT**

The hydrologic modeling is an important support tool in the management and the decision making process on the use of the soil and water. The goal of this work was to evaluate the applicability of the SWAT model in a typical agricultural basin of the “Cerrado” biome, intensively monitored. The selected basin for this study was the Upper Jardim River Basin, which covers an area of approximately 105 km<sup>2</sup>, situated Southeastern Federal District. It is a research watershed, with a great amount of measured data, which is inserted in Cooperative Network of the Research Basins formed by UFPE, UFRPE, UFAL, UFS, UnB, EMBRAPA Cerrados funded public call MCT/FINEP/CT-Hidro 01/2010. The historical period (July/2006 to June/2008) used in this study comprises data from a flow station, four pluviographic seasons localized within the basin and one weather station about 30 km apart watershed. Data of soils collected in the area were also used. The methodological steps consisted in 1- Seletion and loading of the data in SWAT database ; 2-definition of the sub-basins and of the HRU's; 3- Sensitivity analysis; 4- Calibration of the model; 5- Simulation, validation and statistic analysis. Were generated about 6 subbasin and 628 HRU's. The model SWAT was not able to satisfactorily simulate the outputs without the calibration of the most sensitivities parameters being done. The sensitivity analysis identified ten parameters in consonance with other studies realized in Brazil for daily periods. The calibration was done for a year of daily data, Nash and Sutcliffe efficiency tests (ENS) and the determination coefficient (R<sup>2</sup>) corresponded to 0,60 and 0,66, higher values than satisfactory for daily calibration, therefore the model calibration showed good representativeness for daily output of the basin. Yet for the validation ENS and R<sup>2</sup> values were respectively -0,8 e 0,66, not being satisfactory. Generally, although some limitations on the results obtained, mainly in validation phase of the model, depending on the information required to management of water resources, after the calibration, the SWAT model has proven to be a toll capable of use for simulating daily streamflows in the upper Jardim river basin.

**Key words:** Hydrologic modeling, research watershed, measured data.

## LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Alpha BF - Constante de recessão do escoamento de base

ArcGIS - Nome de um grupo de programas informáticos e que constitui um Sistema de informação geográfica

Arc-SWAT - Ferramenta da interface SWAT e Arcgis

ARS - Serviço de Pesquisas Agrícolas

Biomix - Eficiência do revolvimeto biológico

Blai - Índice do potencial máximo de área foliar

CA - California

Canmx - Armazenamento máximo do dossel

Ch\_K2 - Condutividade hidráulica do canal principal

Ch\_N2 - Coeficiente de rugosidade de Manning

CH101 - Estação Pluviográfica Chácara 101

CH121 - Estação Pluviográfica Chácara 121

CH23 - Estação Pluviográfica Chácara 23

cm - centímetros

CN - Curva Número

CN2 - Curva Número para a condição de umidade antecedente II

cp - calor específico a temperatura constante ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ )

COEA - Índice de Eficiência de Nash e Sutcliffe Alterado

CPAC - Embrapa Cerrados

CV - Coeficiente de variação

Cx - Cambissolo

DF - Distrito Federal

E - profundidade da taxa de evaporação ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ )

Ea - quantidade de água evapotranspirada no dia i (mm)

ei - constante pré-definida que é alterada

ei, e1, e2, ep - referem-se ao conjunto de P parâmetro

$e_z^0$  - pressão de saturação de vapor do ar na altura z (kPa)

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ENS - Índice de Eficiência de Nash e Sutcliffe

Epc0 - Fator de compensação de água pelas plantas

Esco - Fator de compensação de evaporação do solo

Esco - Fator de compensação de evapotranspiração do solo

ESRI - Environmental Systems Research Institute

EUA - Estados Unidos da America  
ez - pressão de vapor da água na altura z (kPa)  
fi - fração de cada parâmetro  
Fx – Plintossolo  
G - densidade do fluxo de calor para o solo ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ )  
GIS/SIG - Sistema de Informação Geográfica  
GLUE - Generalized Likelihood Uncertainty Estimation  
GWDelay - Tempo de retardo da água subterrânea (dias)  
GWqmn - Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície  
GWRevap - Coeficiente "revap" de água subterrânea  
Gx - Gleissolo  
 $\text{h}^{-1}$  - hora  
Hnet - saldo da radiação ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )  
HRU - Hydrology Response Units (Unidades de Resposta Hidrológica)  
Ia/  $\lambda$ S - Perdas Iniciais  
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IPH - Modelo do Instituto de Pesquisas Hidráulicas  
j - refere-se a um ponto Hipercubo Latino.  
kg - quilogramas  
km - quilômetros  
kPa - Kilopascal  
LA -Latossolo Amarelo  
LH -Latin Hypercube (Hiperubo Latino)  
LH-OAT - Junção entre os métodos Latin Hypercube e One-Factor-At-a-Time  
LV - Latossolo Vermelho  
LVA - Latossolo Vermelho-amarelo  
m - metros  
M(.) - refere-se às funções do modelo  
 $\text{m}^2$  - metro quadrado  
 $\text{m}^3$  - metro cúbico  
MCM - Markov Chain Monte Carlo  
MDE - Modelo Digital de Elevação  
MG - Minas Gerais  
MJ - Milijoule  
mm - milímetros  
MT - Mato Grosso

NRCS - National Resources Conservation Service (Serviço de Conservação dos Recursos Naturais)

OAT - One-Factor-At-a-Time

°C - graus Celsius

P - Precipitação em mm e

PBIAS - Percentual de tendência

PARASOL - Parameter Solutions method

PR - Paraná

PSO - Particle Swarm Optimization

Q - volume do escoamento superficial ou chuva excedente em mm

Qsurf - quantidade de escoamento superficial no dia i (mm)

$Q_{gw}$  - quantidade de água que retorna ao curso d'água no dia i devido ao escoamento sub-superficial (mm)

R<sup>2</sup> - Coeficiente de Determinação

ra - resistência da difusão da camada do ar

rc - resistência a copa das plantas

Rchrg\_Dp - Fração de água percolada para o aquífero profundo

Rday - quantidade de água precipitada no dia i (mm)

Revapmn - Profundidade em aquífero profundo para que haja "revap"

RGB - Intervalo espectral do visível (Red-Green-Blue)

RQ - Neossolo Quartzarênico

RSR - Razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão das observações

S - capacidade máxima de retenção de água dos solos.

s - segundo

SC - Santa Catarina

SCS - Serviço de Conservação do Solo

SHE - Modelo Sistema Hidrologico Europeu

SHP - Shapefile (Formato de arquivo utilizado pelo ArcGis)

SICAD - Sistema Cartográfico do Distrito Federal

Slope - Declividade média

Ssubbsn - Comprimento da declividade média (m)

SMAP - Modelo Soil Moisture Accounting Procedure

Sol\_Alb - Albedo do solo úmido

Sol\_Awc - Capacidade de água disponível no solo (mm h<sup>-1</sup>)

Sol\_K - Condutividade hidráulica saturada dos solo (mm h<sup>-1</sup>)

Sol\_Z - Profundidade da camada de solo (mm)

SSARR - Modelo StreamFlow Sinthesis and Reservoir Regulation

SSQ - Soma dos Quadrados dos Resíduos

SSQR - Soma dos Quadrados dos Resíduos Ranquedada

SUFI2 - Sequential Uncertainty Fitting

Surlag - Coeficiente de retardo do escoamento superficial (dias)

SW0 - quantidade inicial de água no solo no dia  $i$  (mm);

SWAT- Soil and Water Assessment Tool

SWt - quantidade de água no solo da camada da zona radicular simulada no tempo  $t$  (mm)

$t$  - duração do ciclo hidrológico simulado (dias)

TERRACAP - Companhia Imobiliária de Brasília

UFAL - Universidade Federal de Alagoas

UFPE - Universidade Federal de Pernambuco

UFRPE - Universidade Federal Rural de Pernambuco

UFS - Universidade Federal de Sergipe

UnB - Universidade de Brasília

USDA - Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

UTM - Universal Transversa de Mercator

wseep - quantidade de água que percola da camada simulada para a camada inferior, no dia  $i$  (mm);

$y_i^{obs}$  - vazão observada

$y_i^{sim}$  - vazão simulada

$y^{med,obs}$  - média da vazão observada e

$y^{sim,obs}$  - média da vazão simulada

$\gamma$  - constante psicrométrica ( $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$ )

$\Delta$  - inclinação da curva pressão de saturação de vapor pela temperatura,  $\partial e / \partial T$

$\lambda$  - uma constante de proporcionalidade da abstração inicial em relação à capacidade máxima de água dos solos

$\lambda E$  - fluxo de calor latente ( $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$ )

$\rho_{ar}$  - densidade do ar ( $kg \cdot m^{-3}$ )

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos .....	4
1.1.1 Objetivos Específicos .....	4
1.2 Organização da Dissertação .....	4
2. ESTADO DA ARTE.....	6
2.1 Ciclo Hidrológico.....	6
2.2 Modelos Hidrológicos .....	7
2.3 Modelos Distribuídos .....	10
2.4 SWAT .....	11
2.5 Equacionamentos .....	15
2.5.1 Equação do Balanço Hídrico.....	15
2.5.2 Método Curva Número.....	16
2.5.3 Equação de Penman Monteith.....	20
2.6 Análise de Sensibilidade .....	21
2.6.1 Método LH-OAT (Latin Hypercube - One-Factor-At-a-Time) .....	22
2.7 Calibração .....	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	28
3.1 Características Fisiográficas da Área de Estudo .....	28
3.2 Modelo Conceitual .....	35
3.3 Aplicativos e Organização da Base.....	36
3.4.1 Modelo Digital de Elevação.....	38
3.4.2 Solos.....	38
3.4.3 Características físicas dos solos .....	39
3.4.4 Uso do solo.....	42
3.4.5 Reclassificação dos dados de Uso e Ocupação da terra .....	44
3.4.6 Estações Climatológicas.....	45
3.4.7 Dados Climáticos .....	47
3.4.8 Dados de Vazão.....	50
3.5 Etapas de Execução.....	51
3.5.1 Discretização da Bacia .....	53
3.5.2 Definição das HRU's .....	54
3.5.3 Entrada de Dados Climático.....	55
3.5.4 Período de Aquecimento .....	58

3.5.5 Simulação .....	59
3.5.6 Análise de Sensibilidade .....	59
3.5.7 Calibração e Validação.....	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	63
4.1 Modelo Digital de Elevação.....	63
4.2 Mapa de Uso .....	63
4.3 Processamento dos dados de entrada .....	67
4.4 Simulação.....	72
4.5 Análise de Sensibilidade .....	76
4.6 Calibração .....	81
4.7 Validação.....	89
5. CONCLUSÃO .....	104
ANEXO.....	118

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição das regiões hidrográficas brasileiras e a localização do bioma cerrado. ....	2
Figura 2: Ciclo Hidrológico (Fonte: Mendonça, 2009).....	7
Figura 3: Relação do escoamento superficial e da chuva do Método CN (SCS) ( adaptado de Neitch <i>et al.</i> , 2005a).....	18
Figura 4: Procedimento de Calibração para Fluxo, Sedimentos e Nutrientes (adaptado de Santhi, 2001 e Moriasi, 2007). ....	26
Figura 5: Localização da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim. ....	28
Figura 6: Rede de Drenagem e Modelo Digital de Elevação da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim. ....	29
Figura 7: Geologia da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim.....	30
Figura 8: Domínio Poroso e domínio Fraturado da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim. ....	31
Figura 9: Mapa de Solos da Bacia do Alto Rio Jardim.....	32
Figura 10: Textura dos Solos da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim. ....	34
Figura 11: Modelo conceitual da Bacia do Alto Rio Jardim. ....	36
Figura 12: Fluxograma metodológico para a elaboração do mapa de uso e ocupação da Bacia do Alto Rio Jardim.....	42
Figura 13: Localização das estações climatológica da Embrapa Cerrados e das estações pluviométricas localizadas na bacia do alto rio Jardim.....	46
Figura 14: Série pluviométrica da Bacia do Alto Rio Jardim (Lima, 2010). ....	47
Figura 15: Gráficos das séries históricas climatológicas. A) Umidade; B) Radiação Solar; C) Velocidade do Vento D) Temperatura. ....	49
Figura 16: Localização das estações fluviográficas da Bacia do Alto Rio Jardim (Lima, 2010).....	50
Figura 17: Séries de vazão da Bacia do Alto Rio Jardim (Lima, 2010).....	51
Figura 18: Fluxograma Metodológico. MDE - Modelo Digital de Elevação; HRU – Unidade de Resposta Hidrológica; LH - Hipercubo Latino; OAT - One Factor at a Time.....	52
Figura 19: Distribuição espacial das estações pluviográficas por sub-bacia.....	56
Figura 20: Distribuição anual da chuva na bacia do Alto Rio Jardim (Lima, 2010). A) Estação CH23; B) Estação CH101; C) Estação CH121; D) Estação Laurentino.....	57
Figura 21: Modelo Digital de Elevação gerado para a bacia do Alto Rio Jardim. ....	63

Figura 22: Mapa de uso da Bacia do Alto Rio Jardim .....	64
Figura 23: Sub-bacias, seus respectivos exutórios e hidrografia gerados pelo modelo SWAT para a Bacia Experimental do Alto Rio Jardim. ....	68
Figura 24: Classes de declividade da bacia do Alto Rio Jardim geradas a partir do MDE obtido por interpolação (topo to raster) dos dados topográficos das cartas 1:10.000.....	69
Figura 25: HRU's (Unidades de Resposta Hidrológica) geradas pelo SWAT. ....	71
Figura 26: Balanço hídrico simulado pelo SWAT para o período de 2006 a 2008.....	72
Figura 27: Gráfico comparando a vazão observada (Lima, 2010) e simulada no período de 2006 a 2008 em relação a precipitação para o mesmo período.....	74
Figura 28: Gráfico mostrando a os dados de vazão simulada X vazão observada para a estação no exutório da bacia do Rio Jardim simulados.....	75
Figura 29: Análise de sensibilidade, ranking da sensibilidade pelo método LH-OAT. ....	76
Figura 30: Análise de Sensibilidade, sensibilidade média dos parâmetros de acordo com método LH-OAT.....	78
Figura 31: Gráfico da vazão observada (Lima 2010) e simulada no período de 2006 a 2007.....	82
Figura 32: Gráfico da vazão observada (Lima, 2010) e simulada no período de 2006 a 2007 (dados calibrados).....	85
Figura 33: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 2006 a 2007 (dados sem calibração).....	87
Figura 34: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 2006 a 2007 (dados calibrados).....	87
Figura 35: Balanço hídrico simulado pelo SWAT para o período de 2006 a 2007 (dados calibrados). ....	89
Figura 36: Gráfico da vazão observada (Lima, 2010) e simulada no período de 2007 a 2008 (sem calibração).....	90
Figura 37: Gráfico da vazão observada (Lima, 2010) e simulada no período de 2007 a 2008, intervalo de validação do modelo (dados validados).....	92
Figura 38: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 2007 a 2008.....	93
Figura 39: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 2007 a 2008 após a calibração. ....	94
Figura 40: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 01/07/07 a 30/10/07 (Evento 1) após a calibração. ....	95
Figura 41: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 01/02/08 a 22/02/08 (Evento 2) após a calibração. ....	95

Figura 42: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 06/03/08 a 03/04/08 (Evento 3) após a calibração. ....	96
Figura 43: Gráfico de dispersão dos resíduos dos dados no período de 2006 a 2007 (dados calibrados). ....	97
Figura 44: Gráfico de dispersão dos resíduos dos dados no período de 2007 a 2008 (dados validados). ....	97
Figura 45: Balanço hídrico simulado pelo SWAT para o período de 2007 a 2008 após o período de calibração/validação. ....	99
Figura 46: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 2006 a 2008 (dados calibrados e validados). ....	100
Figura 47: Distribuição da demanda evaporativa do solo em profundidade (Adaptado de Neitsch <i>et al.</i> , 2005b). ....	120
Figura 48: Influência do parâmetro Surlag e do tempo de concentração na fração do escoamento superficial liberado (adaptado de Neithsch <i>et al.</i> 2005b). ....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação da sensibilidade dos parâmetros (Lenhart et al., 2002). .....	22
Tabela 2: Classificação dos resultados por índice de eficiência para a modelagem com o SWAT para estimativas mensais (Adaptado de Moriasi <i>et al.</i> , 2007). .....	27
Tabela 3: Valores médios dos parâmetros de solos medidos (Lima, 2010). .....	40
Tabela 4: Valores de Condutividade Hidráulica Saturada (Lima, 2010). .....	41
Tabela 5: Valores de CN adaptados de Setzer e Porto (1979), Sartori (2004) e Lima (2009). .....	45
Tabela 6: Parâmetros e limites utilizados para a análise de sensibilidade. ....	60
Tabela 7: Área das classes de uso da bacia do Alto Rio Jardim. ....	70
Tabela 8: Área das classes de solo da bacia do Alto Rio Jardim (Adaptado de Reatto et al., 2000). ...	70
Tabela 9: Valores de referência para o balanço hídrico (Lima 2010). .....	73
Tabela 10: Variação dos valores (inicial e final) para os parâmetros utilizados na calibração e o método de variação. ....	83
Tabela 11: Valores de ENS para o período de calibração e validação com o SWAT em bacias do Distrito Federal. ....	98
Tabela 12: Estatística descritiva dos dados de vazão observados e simulados. ....	102

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Trabalhos utilizando o SWAT no Brasil para a estimativa do fluxo de água. ....	13
Quadro 2: Grupo de Solos Hidrológicos da Bacia do Alto Rio Jardim (adaptado de Sartori 2004). ....	39
Quadro 3: Reclassificação dos tipos de uso para a inserção no SWAT. ....	44
Quadro 4: Imagens de cada classe de uso presente na Bacia do Alto Rio Jardim. ....	66
Quadro 5: Classificação da análise de sensibilidade média dos parâmetros (Lenhart <i>et al.</i> , 2002). ....	78
Quadro 6: Parâmetros mais sensíveis para a simulação do SWAT no Brasil. ....	80

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural indispensável à origem e manutenção da vida, está associada as mais diversificadas demandas humanas como, uso doméstico, agrícola, industrial, comercial, científico, alimentício, hospitalar, turístico, navegação, pesca, lazer, abastecimento energético e também para a condução e tratamento do esgoto. A utilização e preservação dos recursos hídricos são de indiscutível importância e mais que isso uma necessidade para a continuidade e conservação do planeta e uma dívida para a sobrevivência das futuras gerações (Oliveira, 2000; Dowbor, 2001; MMA, 2005).

Bem de consumo final ou intermediário, a água é um bem natural finito e sua disponibilidade diminui gradativamente devido ao crescimento populacional, à expansão das fronteiras agrícolas e à degradação do meio ambiente (Perry & Vanderkelein, 1996; Cech, 2009, Tucci 2009).

O desequilíbrio entre a demanda e a disponibilidade de água tem levado à necessidade de se desenvolver uma gestão dos recursos hídricos mais eficiente, que tenha como referencial a compreensão da água enquanto um recurso natural, escasso, fundamental à vida e ao desenvolvimento, devendo ser tratada como um bem público, de uso comum a todos e um recurso de alto valor social, ecológico e econômico (Silva, 2004).

Para Setti *et al.* (2001) os problemas de escassez hídrica no Brasil decorrem, fundamentalmente, da combinação entre o crescimento exagerado das demandas localizadas e da degradação da qualidade das águas. Esse quadro é consequência dos desordenados processos de urbanização, industrialização e expansão agrícola. Sendo da agricultura a maior demanda por água no país, especialmente a irrigação, com quase 69% da demanda das vazões efetivamente consumidas (Setti *et al.*, 2001; ANA, 2005).

Dentro deste contexto, para uma gestão adequada dos recursos hídricos é imprescindível a utilização de bases de dados confiáveis. No entanto, frequentemente estas são insuficientes ou não existem. Neste caso, uma alternativa é a aplicação de modelos matemáticos que possam estimar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica.

Entendendo esta necessidade, os órgãos de fomento criaram um edital (Chamada Pública MCT/FINEP/CT-Hidro 01/2010) específico para o estabelecimento de Redes, com vistas a buscar soluções para esta problemática. Neste âmbito, foi criada a Rede cooperativa de Bacias Experimentais formada pela UFPE, UFRPE, UFAL, UFS, UnB, EMBRAPA Cerrados e outros parceiros nos estados de atuação dos projetos. A REDE tem como objetivo desenvolver, de forma sistematizada e conjunta, metodologias apropriadas para o

aprimoramento e a difusão de técnicas para a manutenção dos ambientes e melhor aproveitamento dos recursos de água e solo. Será avaliado o potencial das bacias experimentais para suporte aos usos múltiplos de recursos hídricos e aumento da oferta, bem como à gestão da produção agrícola. As atividades da UnB e EMBRAPA cerrados estão focadas nas bacias do bioma Cerrado, em especial no DF.

O bioma cerrado ocupa uma área correspondente a aproximadamente 24% do território brasileiro e por se localizar em zona central e de elevada altitude em relação às demais regiões do país, desempenha papel fundamental na produção e distribuição de recursos hídricos para oito das doze grandes regiões hidrográficas brasileiras (Figura 1).

Desde a década de 1970 esse ecossistema vem sendo ocupado de forma acelerada, com destaque para o crescimento dos centros urbanos e o desenvolvimento da agricultura (Menezes, 2009; Lima 2010; ZEE, 2012a).

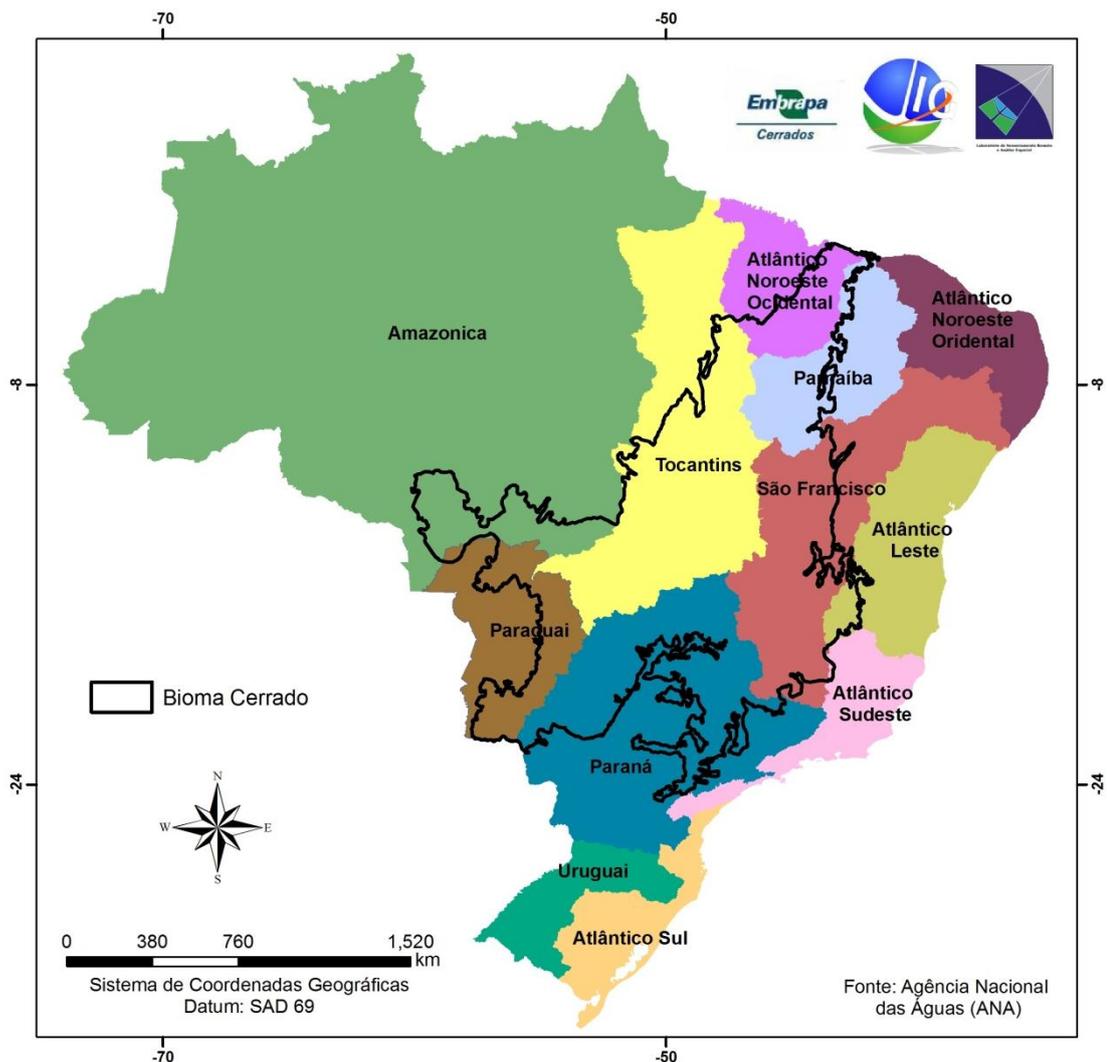


Figura 1: Distribuição das regiões hidrográficas brasileiras e a localização do bioma cerrado.

Inserido neste bioma, o Distrito Federal apresenta importância singular, abrigando nascentes de três importantes bacias hidrográficas do país, Tocantins, São Francisco e Paraná (ZEE, 2012b). A configuração de sua rede hídrica é consideravelmente modesta, e com uma forte sazonalidade, onde a estação seca é bastante severa, com duração de quatro a seis meses (Ecoplan, 2012 - Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do DF - PGIRH/DF). Este fato leva, necessariamente, a uma avaliação contínua de sua capacidade de prover a demanda de recursos hídricos (Albuquerque 1999, ADASA, 2012). Outro fato importante é a evolução do padrão do uso e ocupação do DF, que se deu de forma rápida e desordenada, caracterizado por uma região de adensamento populacional na região da Bacia do Paranoá (Menezes *et al.*, 2012) e entorno e pela expansão agrícola na região da bacia do Rio Preto (UNESCO, 2000 e 2002; Ecoplan, 2012, ZEE, 2012a).

De acordo com Frota (2006) a produção agrícola na bacia do Rio Preto no DF vem utilizando sistemas de irrigação, por meio de pequenos barramentos e captação direta nos mananciais superficiais, feitos pelos produtores. Esses sistemas, que não estão inseridos em um processo planejado de aproveitamento da água e a maioria não dispõem de outorga do direito de uso da água e de licenciamento ambiental para operar, têm sido responsáveis pela retirada de água dos mananciais maior que a capacidade de suporte dos mesmos, provocando sobrexploração, degradação ambiental e conflitos sócioambientais pelo uso d'água.

A bacia do alto rio Jardim é uma das mais importantes sub-bacias da bacia do rio Preto. Trata-se de uma bacia essencialmente agrícola, com o cultivo de grãos como feijão, soja, milho e sorgo, e algodão, cítricos e café, e com destaque para a criação de gado e aves (Lima, 2010). Por este motivo, ela foi escolhida como uma das Bacias Experimentais do DF que em conjunto com a Bacia do Sarandi e Descoberto compõem as áreas de estudo da Rede. Estas bacias são umas das poucas bacias do DF instrumentadas, com disponibilidade de dados para aplicação de modelos e posterior validação.

Neste contexto, a REDE de Bacias Experimentais, adotou o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) como modelo a ser aplicado nas bacias estudadas. Trata-se de um programa que trabalha como uma interface vinculada a um software de GIS (ArcGis ou GRASS) e é um modelo de base física, semidistribuído, computacionalmente eficiente e apesar de exigir grande quantidade de dados para entrada no modelo, o conjunto de dados necessários para a realização da simulação a que se dispõe esse trabalho foram levantadas por Lima (2010) e disponibilizados pelo autor para a realização do mesmo. A hipótese para esse trabalho se baseia na premissa de que a utilização de modelos para representar a realidade é uma

importante ferramenta para o estudo de áreas onde não existem informações hidrológicas e que os resultados gerados podem dar subsídio para o entendimento dos processos e para a tomada de decisões sobre o uso do solo e da água nessas regiões. A aplicabilidade de um modelo dito distribuído, ou no caso do SWAT semidistribuído, permite que os resultados simulados sejam ajustados em relação aos observados, propiciando a análise da variabilidade do processo de forma segmentada. Assim, a hipótese desse trabalho é que o modelo SWAT é capaz de simular de forma eficiente os processos hidrológicos ocorrentes na bacia do alto rio Jardim, e que prováveis discrepâncias nos resultados serão minimizadas por meio de calibração e posteriormente validados.

## 1.1 Objetivos

Avaliar a aplicabilidade do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia experimental de uso predominantemente agrícola, inserida no Bioma Cerrado e intensamente monitorada.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- Identificar quais são os parâmetros mais relevantes e significativos para a aplicação do modelo SWAT na bacia de estudo;
- Calibrar e validar o modelo SWAT para a simulação da vazão em uma bacia agrícola do Cerrado e intensamente monitorada;
- Avaliar se o modelo obtido é capaz de reproduzir adequadamente o comportamento do ciclo hidrológico na bacia.

## 1.2 Organização da Dissertação

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, no decorrer do texto são abordadas e aprofundadas as idéias anteriormente descritas, afim de se chegar até os objetivos almejados. Os propósitos a que se dispõe cada um deles são explicitados sucintamente abaixo.

O capítulo dois traz uma sucinta revisão da literatura sobre temas relacionados a modelagem hidrológica e especificamente ao modelo SWAT e suas aplicações, principalmente acerca de sua utilização em bacias hidrográficas brasileiras, para embasar as etapas subsequentes. O terceiro capítulo aborda quais foram os dados utilizados e como foram obtidos, abrange as etapas e procedimentos empregados para a execução do trabalho e os programas necessários para desempenhar tais atividades.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos para cada etapa desenvolvida, as respostas de saída da modelagem com o SWAT, e uma análise desses resultados, visando a compreensão dos processos representados pelo modelo e sua relação com o comportamento real da bacia.

O quinto e último capítulo expõe as conclusões sobre o trabalho e relaciona algumas sugestões para a sua continuidade em uma oportunidade futura.

## 2. ESTADO DA ARTE

Este capítulo compreende o referencial teórico utilizado para embasar o conhecimento a cerca dos processos empregados para a realização dos objetivos determinados.

### 2.1 Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico é um fenômeno global de circulação da água entre a superfície da terra e a atmosfera, gerado primordialmente pela ação da energia solar atrelada ao movimento gravitacional e a rotação da terra, sendo caracterizado como um sistema fechado se observado a nível global (Silveira, 2009).

Trata-se de um processo dinâmico que representa os diferentes caminhos que a água pode percorrer e se transformar ao longo do tempo. Ele integra três partes do sistema que compõem a Terra: a atmosfera, onde é encontrada principalmente água no estado gasoso; a hidrosfera, representando a água na fase líquida ou sólida na superfície do planeta; e a litosfera, abrangendo todos os tipos de águas subterrâneas (CHOW, 1964).

Os processos hidrológicos ocorrem em duas direções, uma onde o fluxo de água ocorre na forma de vapor como resultado dos fenômenos de evaporação e transpiração, no sentido superfície-atmosfera, e o outro no sentido atmosfera-superfície, constituído pelas precipitações, onde a transferência de água pode acontecer em qualquer um dos três estados físicos (Silveira, 2009).

A água é transformada em vapor pela energia solar que atinge a superfície terrestre, e pela transpiração dos organismos vivos sobe para a atmosfera, onde esfria progressivamente dando origem às nuvens, tais massas de água retornam para a Terra sob a ação da gravidade, e em forma de precipitação, constituindo assim o Ciclo Hidrológico (Figura 2), configurado pelo permanente movimento da água no planeta (Setti *et al.*, 2001).

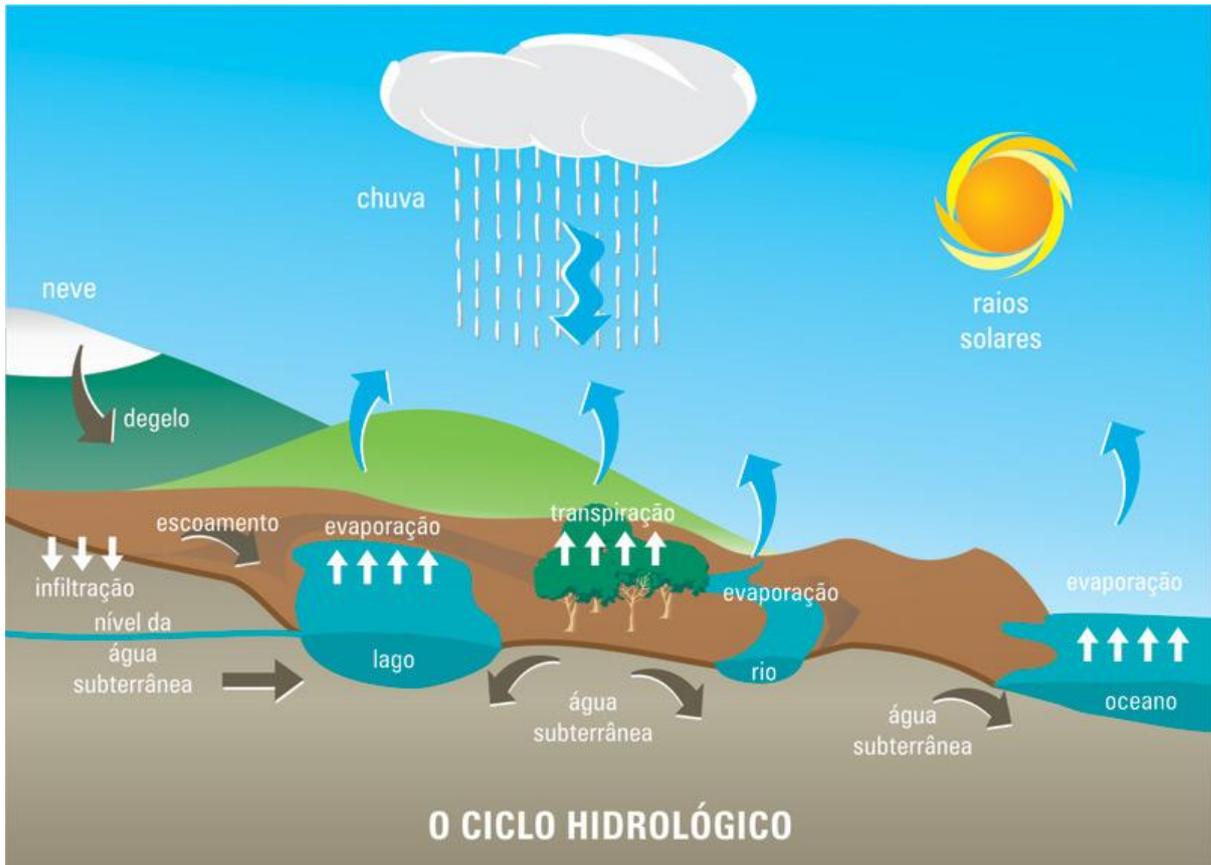


Figura 2: Ciclo Hidrológico (Fonte: Mendonça, 2009).

Conforme exemplifica a figura, o ciclo hidrológico é constituído pelas seguintes fases, precipitação, que corresponde à água que cai da atmosfera sobre a superfície terrestre. Escoamento, caracterizado pelo movimento de deslocamento da água na superfície da Terra, podendo ser superficial ou subsuperficial. Infiltração, que abrange a porção de água que penetra no solo. Percolação, que consiste no movimento de água dentro do perfil do solo. Evaporação, processo de transformação da água em estado líquido para a fase gasosa. E a Transpiração, processo de perda de vapor d'água pelas plantas (Uzeika, 2009).

## 2.2 Modelos Hidrológicos

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem esta realidade, de maneira geral, um modelo é um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros (Rennó & Soares, 2000).

O modelo nada mais é que a representação do comportamento de um sistema, esse por sua vez se trata de qualquer estrutura, esquema ou procedimento real ou abstrato que num

determinado tempo de referência se inter-relaciona com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação (Dooge, 1973; Tucci 1998).

Os modelos matemáticos de simulação permitem uma grande flexibilidade por possibilitarem que um sistema qualquer seja representado matematicamente em modelos computacionais, além de possibilitar a análise no nível de detalhamento requerido (Azevedo *et al.*, 1997).

Um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre. Estes modelos 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, ou apenas representar parte dessas variáveis, dependendo do tipo de modelo e a que ele se dispõe (Rennó & Soares, 2000), como por exemplo modelos chuva-vazão.

A modelagem hidrológica se caracteriza como uma ferramenta que possibilita a representação de processos hidrológicos. Assim sendo, algumas de suas vantagens principais estão relacionados à previsão de condições diferentes das observadas, prever situações futuras, por vezes reproduzir o passado e dar suporte ao processo de tomada de decisão (Machado, 2002; Tucci, 1998). Além do ganho obtido com as previsões, tem-se a vantagem do baixo custo e da rapidez do processamento.

De modo geral e considerando a natureza de cada modelo, as principais limitações da modelagem hidrológica estão relacionadas as condições quantitativas e qualitativas dos dados hidrológicos, as dificuldades de formular matematicamente alguns processos, e a simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenômenos. A dificuldade de se modelar uma bacia devido a heterogeneidade dos processos envolvidos tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização, prioridades da representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados (Tucci, 1998).

A escolha do modelo apropriado para determinado estudo de caso, irá depender de uma série de fatores específicos para sua aplicação. Deve-se observar em primeira análise qual o objetivo de seu uso, o que se deseja do modelo, em seguida devem ser considerados a quantidade e disponibilidade dos dados, a precisão requerida, a existência de corpo técnico

capacitado para utilizar e interpretar as saídas do modelo, o tempo gasto com a modelagem e a existência de equipamentos com capacidade para o processamento (Lima, 2010).

De acordo com Beven (1989), a aplicação de um modelo deve considerar a possibilidade de inter-relação entre os processos estudados em escalas detalhadas, a relação entre a escala de previsão do modelo e as aferições de campo utilizadas, bem como as relações entre as equações do modelo e os processos físicos, e por fim, as incertezas nas previsões do modelo.

Segundo Dooge (1986), deve-se considerar a utilização de modelos de base física que considerem a variabilidade espacial dos diversos parâmetros e ou desenvolver modelos realísticos na escala da bacia onde o efeito global da variabilidade espacial e dos parâmetros seja parametrizado, assim, pode-se prever o comportamento de uma bacia com maior precisão.

Autores como Singh (1995), Viessman Jr. & Lewes (1996) e Tucci (1998) abordam os diferentes tipos de modelos em diversas classes de acordo com suas especificidades. Os modelos podem ser classificados sob diferentes aspectos, como, geração, forma de representação dos dados, tipologia das variáveis aplicadas na modelagem, forma como se estabelecem as relações entre as variáveis, existência de relações espaciais e dependência temporal (Lima, 2010). Assim, os modelos são classificados como:

- Empíricos: ajustam os valores calculados aos observados sem considerar os processos físicos envolvidos;
- Físicos: incluem tecnologias análogas e princípios de semelhança aplicados a modelos de pequena escala;
- Matemáticos: representam o sistema com base em proposições matemáticas;
- Dinâmicos: envolvem mudanças e interações ao longo do tempo;
- Estáticos: examinam os processos sem considerar o fator temporal;
- Conceituais: consideram os processos físicos em suas funções;
- Estocásticos: inserem o conceito de probabilidade em suas formulações;
- Determinísticos: seguem uma lei definida, oposta a das probabilidades, um mesmo dado de entrada irá gerar a mesma saída;
- Contínuos: os fenômenos representados são contínuos no tempo;
- Discretos: as mudanças de estado se dão em intervalos discretos;
- Concentrado: não considera a variabilidade espacial;

- Distribuídos: suas variáveis e parâmetros dependem das características de temporalidade e espacialidade.

A classificação dos modelos hidrológicos é possível porque muitos modelos compartilham das mesmas similitudes estruturais e pressuposições (Christofolletti, 1999).

### 2.3 Modelos Distribuídos

O grau de representação das variações espaciais e temporais nos parâmetros de entrada e saída talvez represente a propriedade mais importante de um modelo hidrológico. Pode-se, então, diferenciar entre um modelo concentrado e um modelo distribuído. Enquanto, nos modelos concentrados, assume-se que os parâmetros e variáveis variam somente com o tempo, define-se modelos distribuídos como aqueles em que os parâmetros e variáveis variam tanto no espaço quanto no tempo (Santos, 2002).

Um modelo pode ser designado concentrado quando sua escala é equivalente a escala do processo, a totalidade da bacia hidrográfica. Quando os elementos utilizados possuem menor magnitude que a escala dos processos físicos, esse é considerado um modelo distribuído (Devantier & Feldman, 1993).

Para Beven (1985) a utilização de modelos distribuídos se enquadra potencialmente para previsão de fenômenos, principalmente previsão dos efeitos de uso da terra, previsão dos efeitos de localização espacial das variáveis de entrada e saída, previsão do movimento de poluentes e sedimentos e para a previsão de resposta hidrológica não monitorada, onde os dados estão disponíveis para modelos concentrados.

De acordo com Tucci (1998) de forma pragmática nenhum modelo é puramente distribuído, já que são utilizadas discretizações numéricas que de alguma maneira tornam um modelo distribuído em concentrado numa pequena subdivisão.

Os modelos distribuídos não garantem necessariamente melhores resultados do que alguns modelos semiconceituais concentrados, mas permitem realizar com melhor embasamento a modificação das características do sistema, o que é praticamente impossível através dos modelos semiconceituais, devido ao excesso de empirismo e da característica concentrada de sua formulação (Tucci, 1998).

Os modelos distribuídos, agregados à modelos digitais de terreno e ao geoprocessamento, têm buscado melhorar a representatividade espacial e temporal do comportamento das diferentes partes da bacia, sujeitas a diferentes ações antrópicas (Tucci, 1998). A integração do SIG com modelos hidrológicos e sua aplicação em bacias

hidrográficas permite a realização de numerosas operações, como o projeto, calibração, simulação e comparação entre modelos, permite ainda subdividir a bacia em áreas homogêneas (Calijuri *et al.*, 1998).

De acordo com Rennó & Soares (2000) a discretização espacial de bacias hidrográficas possui dois tipos de abordagem, uma onde a divisão é realizada em partes denominadas objetos, caso de modelos que utilizam a divisão de sub-bacias, onde geralmente a discretização é realizada com base nos canais naturais e nos caminhos de escoamento da bacia, estes são designados modelos semidistribuídos. Na outra a discretização é baseada na divisão do espaço em campos contínuos, formando uma grade regular, em que cada campo corresponde a uma célula, permitindo dessa forma um maior nível de detalhe.

São considerados como modelos semidistribuídos, entre outros os modelos Stanford IV, IPH do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Curva Número, SSARR, SMAP, SHE e o modelo SWAT, estes são assim designados por limitar a discretização espacial a uma área determinada.

#### 2.4 SWAT

O *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT) é um modelo em escala de bacia hidrográfica desenvolvido no Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), Serviço de Pesquisas Agrícolas (ARS), criado para predizer o impacto de práticas de manejo da terra e água, produção de sedimentos e agroquímicos em bacias hidrográficas complexas com variados solos e condições de uso da terra (Neitshet *et al.*, 2005a).

Desde sua criação no começo da década de 90, o modelo vem sofrendo contínuas revisões e expansões de suas capacidades. É um modelo de base física, computacionalmente eficiente e capaz de realizar simulações contínuas por longos períodos de tempo (Neitsch *et al.*, 2005a; Gassman *et al.*, 2007).

O modelo SWAT foi desenvolvido com capacidade para desenvolver simulações de escoamento superficial, percolação, fluxo lateral e subterrâneo, evapotranspiração, neve e fluxo de rede de drenagem, análises em reservatórios, ciclo hidrossedimentológico, aspectos climáticos, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas e bactérias, práticas agrícolas e aspectos de qualidade da água (Neitsch *et al.*, 2005a; Dhar, 2009).

Para descrever a relação entre as variáveis de entrada e saída o SWAT necessita de dados específicos de clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de gestão do uso da terra ocorrentes na bacia. Os processos físicos associados ao movimento da água e

dos sedimentos, crescimento de plantas, ciclagem de nutrientes e outros, são modelados diretamente pelo SWAT por meio destes dados de entrada (Neitsch *et al.*, 2005a). Para a execução rigorosa das equações, os dados de entrada necessários são bastante detalhados (Bekiaris *et al.*, 2005).

Para simular os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica o SWAT possui duas divisões principais. A primeira é a fase da terra do ciclo hidrológico, que controla a quantidade de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas carregados para o canal principal em cada sub-bacia. A segunda divisão é a fase de água ou encaminhamento do ciclo hidrológico, que pode ser definida pela propagação da água, sedimentos, e outros através da rede de canais da bacia para a saída (Neitsch *et al.*, 2005a).

O SWAT tem mostrado ser uma ferramenta eficiente para a avaliação dos recursos hídricos e para problemas de fontes de poluição não pontuais em uma ampla gama de escala e condições ambientais em todo o globo (Gassman *et al.*, 2007). Inúmeros trabalhos já foram produzidos utilizando o SWAT em diferentes localidades e para diversas aplicações (Conan *et al.*, 2003; Gassman *et al.*, 2003; Pikounis *et al.*, 2003; Bekiaris *et al.*, 2005; Govender & Everson, 2005; Bracmort *et al.*, 2006; Dabele *et al.*, 2006; Hu *et al.*, 2007; Santhi *et al.*, 2006; Setegn *et al.*, 2008; Redcliffe *et al.*, 2009; Betrie *et al.*, 2011).

No Brasil o modelo também vem sendo largamente empregado como observado nos trabalhos de Prado (2005), Neves *et al.* (2006), Santos *et al.* (2006), Adriolo *et al.* (2008), Mercuri *et al.* (2009), Paim & Menezes (2009), Uzeika (2009), Bonumá *et al.* (2010), Durães (2010), Marchioro *et al.* (2011), Carvalho Neto (2011), Carvalho Neto *et al.* (2011), Fernandes *et al.* (2012) e Malutta (2012).

No Quadro 1 é apresentada uma relação com artigos e dissertações que utilizaram o SWAT no país com enfoque para a estimativa das componentes do ciclo hidrológico mesmo que atreladas a produção de sedimentos, de forma geral os trabalhos objetivam a modelagem do fluxo de água em diferentes bacias brasileiras com características diferenciadas.

Quadro 1: Trabalhos utilizando o SWAT no Brasil para a estimativa do fluxo de água.

<b>Autor</b>	<b>Trabalho</b>	<b>Ano</b>
Machado	Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento	2002
Machado <i>et al.</i>	Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento	2003
Baldissera	Aplicabilidade do modelo de simulação Hidrológica SWAT (SoilandWateAssessment tool), para a bacia Hidrográfica do rio Cuiabá/MT.	2005
Santos <i>et al.</i>	Simulação com modelo SWAT das condições hidrológicas e de produção e transporte de sedimentos na bacia do rio Apucarantina - PR	2006
Baltokoski	Modelo SWAT2005 aplicado às sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiros-Pato Branco-PR	2008
Lopes	Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT	2008
Lopes <i>et al.</i>	Análise da produção de água e de sedimento em uma microbacia experimental com a aplicação do modelo SWAT	2008
Lino <i>et al.</i>	Análise da vazão da bacia hidrográfica do Rio Preto com o modelo SWAT	2009
Lubitz	Avaliação da aplicação do modelo hidrológico SWAT à bacia do ribeirão Concórdia-Lontras-SC	2009
Maluta <i>et al.</i>	Aplicação do modelo SWAT no gerenciamento de bacias hidrográficas: Bacias-escola na região norte catarinense	2009
Souza <i>et al.</i>	O modelo SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro	2009
Blainski	Aplicação do modelo hidrológico SWAT (SoilandWaterAssessment Tool) para a simulação da perda de solo e da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica não instrumentada	2010
Lelis & Calijuri	Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT	2010
Blainski <i>et al.</i>	Modelagem e simulação do uso do solo e as alterações no Ambiente	2011
Ferrigo	Utilização do modelo SWAT na estimativa de produção de sedimentos na bacia do córrego Capão Comprido no Distrito Federal	2011
Uzeika <i>et al.</i>	Use of the Swat Model for Hydro-Sedimentologic Simulation in a Small Rural Watershed	2012
Lelis <i>et al.</i>	Análise de Sensibilidade e Calibração do Modelo Swat Aplicado em Bacia Hidrográfica da Região Sudeste do Brasil	2012
Andrade <i>et al.</i>	Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG	2013

Carvalho (2010) utilizou o modelo SWAT para estimar a produção de sedimentos na sub-bacia do Ribeirão Rodeador, uma das sete sub-bacias contribuintes ao lago do Descoberto - DF. Os resultados deste estudo demonstraram que o modelo utilizado sem calibração não foi capaz de reproduzir a produção de sedimentos na Sub-Bacia Hidrográfica de forma satisfatória, tendo subestimado os valores finais. Para a estimativa de fatores como escoamento superficial, produção de água e evapotranspiração o modelo apresentou melhor desempenho.

Para a sub-bacia do Córrego Capão Cumprido, contribuinte da bacia do Rio Descoberto, Ferrigo *et al.* (2012) realizou a simulação da carga de sedimentos calibrado apenas pelos dados de vazão, através do SWAT, para um período de vinte e um anos, usando para a calibração da vazão os anos de 2000 a 2005, utilizando os dados médios mensais, obteve para essa análise um ENS de 0.69. A validação da modelagem foi efetuada para os anos 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009, com índice de Nash e Sutcliffe respectivamente de 0.84, 0.55 e 0.81. Utilizando os mesmos parâmetros para a estimativa das cargas de sedimentos o modelo simulou 1334, 8 toneladas, enquanto que os dados observados apresentam cargas de 1552,7 toneladas, tendo a modelagem sido considerada satisfatória para esse estudo.

Salles (2012) aplicou o modelo para a bacia hidrográfica do ribeirão Pipiripau, para a simulação da vazão na bacia, o modelo foi calibrado manualmente, em relação à vazão média mensal observada em um período de dez anos (1989 a 1998) e depois validado com uma série independente (1999 a 2008). Após a calibração do modelo os resultados obtidos indicaram um bom ajuste entre a vazão média mensal simulada pelo modelo SWAT e os dados observados. A simulação da vazão média mensal também foi satisfatória no período selecionado para validação do modelo com índice de Nash e Sutcliffe (ENS) de 0,79, índice de Nash e Sutcliffe alterado (COEA) de 0,65, o qual considera a média mensal inter-anual, e percentual de tendência (PBIAS) de 21,49%, e a razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão das observações (RSR) de 0,49. Esses resultados demonstram que o modelo SWAT simulou, de forma satisfatória, as vazões médias mensais do ribeirão Pipiripau, após um período de calibração.

O modelo SWAT possui aplicabilidade comprovada para auxiliar gestores ambientais em práticas de conservação do solo e água em bacias hidrográficas. Diante de estudos promissores com a utilização do modelo SWAT em diversos locais do mundo, esse modelo

torna-se um suporte para resultados e fundamentação científica, motivando discussões e propostas de soluções aos problemas ambientais em bacias hidrográficas (Uzeika, 2009).

## 2.5 Equacionamentos

O SWAT incorpora algumas das equações mais comuns para realizar a simulação hidrológica do fluxo. Não se trata de um simples modelo, mas sim de um agregado de vários modelos pré-existentes que foram aprimorados e utilizados para a simulação de cada uma das etapas do processo (Carvalho, 2010).

Segundo Neitsh *et al.* (2005a) a fase da terra do ciclo hidrológico simulado pelo SWAT é baseado na equação do balanço hídrico, que é a força responsável por tudo que ocorre na bacia hidrográfica. Para o cálculo de estimativa do escoamento superficial o SWAT fornece os métodos do CN (Curva Número) e o método de infiltração de Green e Ampt, e para o cálculo da evapotranspiração o modelo disponibiliza os métodos de Penman Monteith, Priestley-Taylor e o método de Hargreaves.

Para esse trabalho o método adotado para estimar o escoamento superficial foi o método Curva Número e para a simulação da evapotranspiração a equação utilizada foi a de Penman Monteith, que serão abordadas nas seções 2.5.2 e 2.5.3, respectivamente. As demais equações realizadas pelo modelo para estimar o fluxo da água podem ser encontradas em Neitsh *et al.* (2005a).

### 2.5.1 Equação do Balanço Hídrico

O modelo SWAT usa como base para a simulação do ciclo hidrológico a equação do balanço hídrico. Dada pela seguinte equação (Eq.1):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Eq.1}$$

Onde:

$SW_t$  é a quantidade de água no solo da camada da zona radicular simulada no tempo t (mm);

$SW_0$  é a quantidade inicial de água no solo no dia i (mm);

t é a duração do ciclo hidrológico simulado (dias);

$R_{day}$  é a quantidade de água precipitada no dia i (mm);

$Q_{surf}$  é a quantidade de escoamento superficial no dia i (mm);

$E_a$  é a quantidade de água evapotranspirada no dia i (mm);

$w_{seep}$  é a quantidade de água que percola da camada simulada para a camada inferior, no dia i (mm);

$Q_{gw}$  é a quantidade de água que retorna ao curso d'água no dia  $i$  devido ao escoamento sub-superficial (mm).

### 2.5.2 Método Curva Número

O método da Curva-Número (CN), desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS), foi objeto de estudo de mais de vinte anos de observações entre as relações de chuva e escoamento em pequenas bacias rurais nos Estados Unidos (Neitsch *et al.*, 2005a).

O modelo determina a quantidade de chuva que infiltra no solo ou no aquífero e a quantidade de chuva que escoam superficialmente numa determinada região em função do uso e ocupação do solo e do grupo de solos hidrológicos (Zhan & Huang, 2004).

O método do número da curva de escoamento superficial ou simplesmente método do CN permite estimar a precipitação excedente resultante de uma determinada chuva para uma área conhecida de drenagem (Sartori, 2004).

De acordo com Menezes (2009) o modelo estima o número da curva de escoamento superficial e com este a porção da precipitação que resultará em escoamento superficial, através de informações como uso e ocupação e umidade antecedente dos solos.

Originalmente foi elaborado para áreas rurais, mas com o seu aprimoramento, o método se difundiu, ganhou credibilidade e passou a ser aplicado em áreas urbanas de diversos países (Gonçalves, 2007).

É um método que permite estimar o valor da distribuição e o volume do escoamento superficial, seu modelo matemático possui dois módulos, onde primeiramente é realizada a separação do escoamento e posteriormente a propagação do mesmo (Menezes, 2009).

A equação para o escoamento superficial é dada por (Eq. 2):

$$Q = \frac{(P-Ia)^2}{P-Ia+S} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

Q é o volume do escoamento superficial ou chuva excedente em mm;

P é a Precipitação em mm e;

S é a capacidade máxima de retenção de água dos solos.

É necessário que se realize o cálculo das perdas iniciais (Ia), que se refere a altura de chuva precipitada, até o início do escoamento superficial, essas perdas são constituídas pela interceptação, retenção em infiltrações e depressões, até a saturação da camada superficial do

solo (NRCS, 1997). Como essas variáveis raramente são conhecidas, há a seguinte relação proposta pelo SCS:

$$I_a = \lambda S$$

Onde:

$S$  é a capacidade de retenção máxima da água dos solos e;

$\lambda$  é uma constante de proporcionalidade da abstração inicial em relação à capacidade máxima de água dos solos.

Ponce e Hawkins (1996) comentam que para justificar a equação, o SCS utilizou dados obtidos de diversas pequenas bacias hidrográficas dos Estados Unidos, dos quais em 50 % dos pares de valores encontraram  $\lambda$  variando de 0,095 a 0,38. Citam também que valores variando de  $0,0 \leq \lambda \leq 0,3$  têm sido documentado em diversos estudos realizados para vários locais dos Estados Unidos. O SCS adotou um valor médio  $\lambda = 0,2$  que é o padrão do método recomendado para projeto.

De acordo com os princípios adotados pelo SCS, não existe precipitação efetiva até que as perdas iniciais sejam integralmente satisfeitas (Gonçalves, 2007). Isso quer dizer que, a ocorrência de escoamento superficial está condicionada a:

$$P > I_a$$

Onde:

$P$  representa a precipitação ocorrida desde o início e;

$I_a$  representa as perdas iniciais.

O SCS considera que a precipitação efetiva pode ser calculada pela seguinte equação (Eq. 2):

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{Para } P > 0,2S \quad \text{Eq. 2}$$

Para o cálculo da Precipitação excedente (Eq. 2.1):

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad \text{Para } I_a > 0,2S \quad \text{Eq. 2.1}$$

De acordo com Sartori (2004) para o cálculo do escoamento direto  $Q$  a partir de uma conhecida precipitação  $P$ , há necessidade de uma estimativa média para a variável desconhecida  $S$ . Com este propósito, visando uma aplicação mais prática da equação da precipitação excedente, foi elaborado pelo SCS o número da curva de escoamento superficial, o  $CN$ .

O *CN* é um parâmetro adimensional e os valores encontram-se tabelados de acordo com a combinação do grupo hidrológico do solo com o tipo de cobertura e tratamento da terra, ambos associados a uma condição de umidade antecedente do solo (Gonçalves, 2007).

O *CN* representa uma curva média de infiltração que separa a parte da precipitação que escoará superficialmente. O número de cada curva está relacionado com a capacidade de retenção máxima dos solos (*S*), dado por (Eq. 3):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{para precipitação em mm} \quad \text{Eq. 3}$$

Resolvendo a equação para *CN* tem-se (Eq. 3.1):

$$CN = \frac{25400}{254+S} \quad \text{para precipitação em mm} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Segundo Gonçalves (2007) os valores do *CN* retratam as condições do solo, variando desde uma cobertura muito permeável (limite inferior, valor = 0) até uma cobertura completamente impermeável (limite superior, valor = 100). Observa-se, contudo, a existência de condições teóricas extremas de *S*, ora tendendo ao infinito, ora sendo nulo (Figura 3).

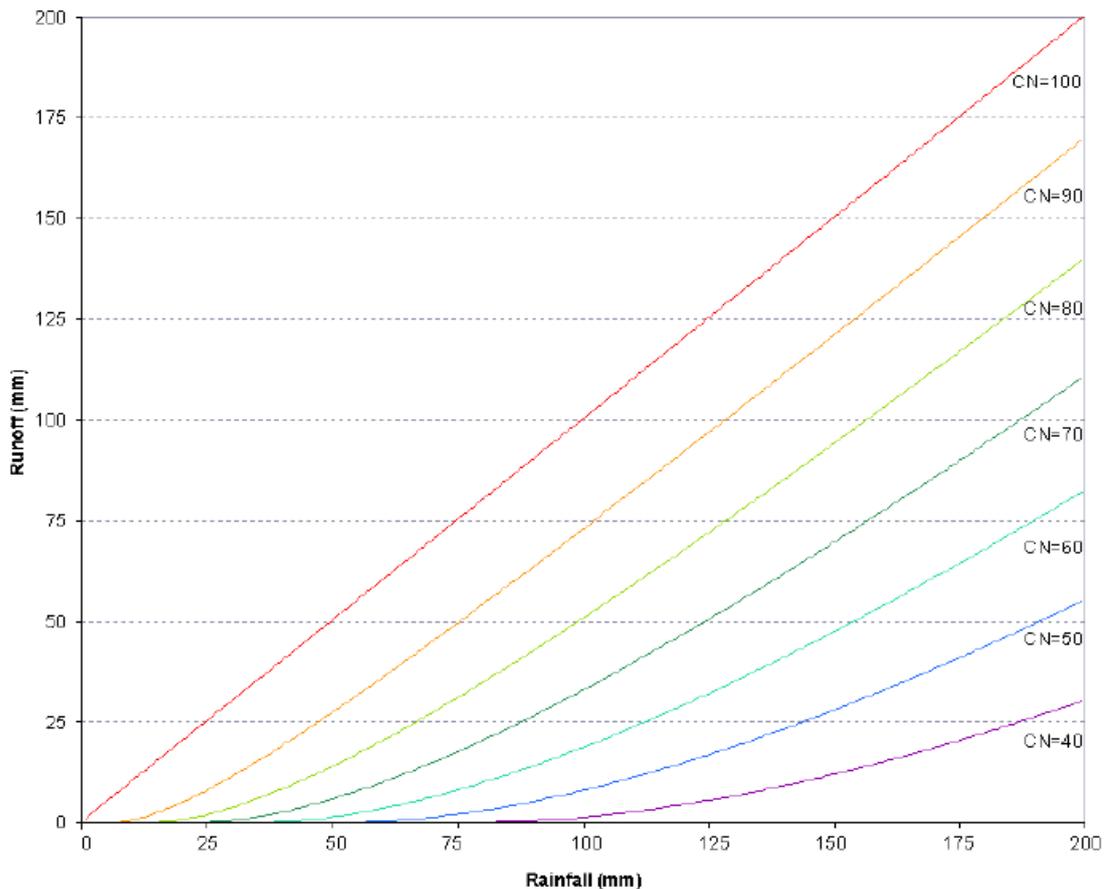


Figura 3: Relação do escoamento superficial e da chuva do Método CN (SCS) ( adaptado de Neitch *et al.*, 2005a).

A variabilidade nos resultados de CN está vinculada a intensidade e duração da chuva, precipitação total, condições de umidade do solo e densidade de cobertura, tais causas de variabilidade são chamadas coletivamente de condição de umidade antecedente e são divididas em três classes, onde I para condições de seca, II condições intermediárias e III para condições mais úmidas, para expressar a dispersão quantitativamente é utilizada a umidade antecedente do solo indicada pela precipitação de cinco dias anteriores (NRCS, 1997).

Segundo Gonçalves (2007) a condição de umidade antecedente do solo foi usada como um parâmetro representativo da variabilidade natural de umidade. Desse modo, a variabilidade do CN depende do volume precipitado num período de 5 a 30 dias antecedente a uma determinada chuva, considerando o período de seca a estação úmida distintivamente. Tendo em vista tal fato, o SCS definiu três condições de umidade antecedente de solo:

**Condição I:** Limite inferior da umidade ou limite superior para o S. O SWAT considera a condição I como o ponto de murcha dos solos.

**Condição II:** Condição de umidade média aplicada para as tabelas de CN.

**Condição III:** Limite superior da umidade ou limite inferior para o S. Esta condição é considerada como sendo a capacidade de campo do solo.

De acordo com o NRCS (1997) componentes de uma mesma unidade de solos com características físicas semelhantes tenderão a se comportar de maneira similar em relação ao escoamento superficial quando expostos a determinada precipitação.

A partir deste pressuposto os solos dos Estados Unidos foram divididos em quatro grupos hidrológicos, estes são determinados conforme a transmissão da água pela camada de solo com a menor condutividade hidráulica saturada e a profundidade de qualquer camada de acordo com profundidade. Levando em consideração a taxa de transmissão de água, textura, quantidade de matéria orgânica, estrutura e grau de inchamento quando saturados (Sartori, 2004). Assim os solos são classificados como:

**Grupo A:** Compreende os solos com baixo potencial de escoamento, contendo alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados, consistindo principalmente de areias ou cascalhos, ambos profundos e excessivamente drenados. Estes solos têm uma alta taxa de transmissão de água (taxa mínima de infiltração:  $> 7,62$  mm/h).

**Grupo B:** Compreende os solos contendo moderada taxa de infiltração quando completamente molhados, consistindo principalmente de solos moderadamente profundos a profundos, moderadamente a bem drenados, com textura moderadamente fina a

moderadamente grossa. Estes solos possuem uma moderada taxa de transmissão de água (taxa mínima de infiltração: 3,81-7,62 mm/h).

**Grupo C:** Compreende os solos contendo baixa taxa de infiltração quando completamente molhados, principalmente com camadas que dificultam o movimento da água através das camadas superiores para as inferiores, ou com textura moderadamente fina e baixa taxa de infiltração. Estes solos têm uma baixa taxa de transmissão de água (taxa mínima de infiltração: 1,27-3,81 mm/h).

**Grupo D:** Compreende os solos que possuem alto potencial de escoamento, tendo uma taxa de infiltração muito baixa quando completamente molhados, principalmente solos argilosos com alto potencial de expansão. Pertencem a este grupo, solos com uma grande permanência do lençol freático, solos com argila dura ou camadas de argila próxima da superfície e solos expansivos agindo como materiais impermeabilizantes próximos da superfície. Estes solos têm uma taxa muito baixa de transmissão de água (taxa mínima de infiltração: 0 - 1,27 mm/h).

### 2.5.3 Equação de Penman Monteith

A equação de Penman Monteith possui base física e é obtida através de representações simplificadas do fluxo de calor latente e sensível a partir de uma superfície úmida associada a equação do balanço de energia a uma superfície (Collichon & Tassi, 2010). Essa equação considera os valores de radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura, calculada pela seguinte expressão (Eq. 4):

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{\text{net}} - G) + \rho_{\text{air}} \cdot c_p \cdot [e_z^0 - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad \text{Eq.4}$$

Onde:

$\lambda E$  é o fluxo de calor latente ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ );

$E$  é a profundidade da taxa de evaporação ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ );

$\Delta$  é a inclinação da curva pressão de saturação de vapor pela temperatura,  $\partial e / \partial T$ ;

$H_{\text{net}}$  é o saldo da radiação ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ );

$G$  é a densidade do fluxo de calor para o solo ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ );

$\rho_{\text{ar}}$  é a densidade do ar ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$c_p$  é o calor específico a temperatura constante ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ );

$e_z^0$  é a pressão de saturação de vapor do ar na altura  $z$  (kPa);

$e_z$  é pressão de vapor da água na altura  $z$  (kPa);

$\gamma$  é a constante psicrométrica ( $\text{kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$ );

$r_c$  é a resistência a copa das plantas;

$r_a$  é a resistência da difusão da camada do ar.

Tucci (1998) afirma que os métodos mais utilizados para a estimativa da evapotranspiração potencial são os métodos de Thornthwaite e o método de Penman Monteith. O primeiro, apesar das grandes limitações e por vezes subestimar os resultados, é frequentemente empregado por utilizar apenas a temperatura. O segundo é o mais recomendado, exige mais informações climáticas, que nem sempre estão facilmente disponíveis, mas como a variabilidade espacial e temporal da evapotranspiração não é tão grande, se comparada a da precipitação, esses dados podem ser utilizados de estações que se situam fora da bacia.

## 2.6 Análise de Sensibilidade

A sensibilidade é medida como a resposta de uma variável de saída a mudança de um parâmetro de entrada. Quanto maior a mudança na resposta de saída, maior a sensibilidade (White & Chaubey, 2005). A análise de sensibilidade avalia como diferentes parâmetros podem influenciar numa saída prevista, os parâmetros identificados como mais sensíveis são geralmente utilizados para calibrar o modelo (White & Chaubey, 2005).

De acordo com Lenhart *et al.* (2002) para que a calibração seja realizada de maneira coerente é necessário que se tenha claro entendimento de todos os parâmetros de entrada e os processos representados no modelo. A acurácia dessas previsões irão depender do quão bem definidas são as estruturas do modelo e de como esses parâmetros são determinados (Duan *et al.*, 1994).

A delimitação dos intervalos para a variação dos parâmetros é extremamente importante para definir a sua sensibilidade no modelo. Os limites de variação devem ser definidos de acordo com a realidade do parâmetro para a bacia estudada, caso contrário, parâmetros que não são sensíveis podem apresentar alta sensibilidade e parâmetros que são realmente importantes podem ser desconsiderados por apresentarem baixa sensibilidade, o que implica posteriormente numa calibração que irá desconsiderar os critérios físicos da bacia, fugindo da realidade do local.

A substituição convencional por uma porcentagem fixa dos valores iniciais, apresenta uma problemática. Por um lado, se a resposta do modelo para a variação do parâmetro é não linear, então os resultados irão depender de como os valores iniciais são escolhidos, porque um menor valor inicial leva a uma menor variação e um maior valor inicial a uma maior variação. Por outro lado, se o valor inicial do parâmetro é localizado próximo ao limite

superior ou inferior do intervalo de variação definido, a variação pode conduzir a valores não admissíveis para além dos intervalos definidos (Lenhart *et al.*, 2002).

Os resultados obtidos na análise de sensibilidade apresentam quais são os parâmetros mais representativos para o modelo, o que irá indicar quais parâmetros devem ser utilizados na calibração, que irão responder com maior impacto quando alterados. Nesse sentido, Lenhart *et al.* (2002) classificou os modelos de acordo com a sua sensibilidade, utilizando os valores médios obtidos na análise (Tabela 1).

Tabela 1: Classificação da sensibilidade dos parâmetros (Lenhart *et al.*, 2002).

Classe	Índice	Sensibilidade
I	$0,00 \leq  I  \leq 0,05$	Baixa
II	$0,05 \leq  I  \leq 0,20$	Média
III	$0,20 \leq  I  \leq 1,00$	Alta
IV	$ I  \geq 1,00$	Muito alta

Van Griesven (2006) avaliou a sensibilidade dos parâmetros de acordo com o *ranking* final da análise considerando maior efeito aos valores com *rank*1 e menor sensibilidade para aqueles com o valor igual ao número de parâmetros utilizados na análise.

Os métodos de análise de sensibilidade podem ser de análise local e global. Os métodos que utilizam a análise local dispõem a tendência do modelo em um dado ponto do espaço amostral, ou seja, para um determinado cenário de controle (Saltelli *et al.*, 2000). Já os modelos que utilizam o método global são capazes de abranger todo o espaço amostrado, sendo estes, processos analíticos mais complexos. Para a análise de sensibilidade, o modelo SWAT utiliza a combinação do *Latin Hypercube* (LH) e o *One-Factor-At-a-Time* (OAT) (Neitsch *et al.*, 2005a).

#### 2.6.1 Método LH-OAT (Latin Hypercube - One-Factor-At-a-Time)

Este método combina a robustez da amostragem Hipercubo Latino, que assegura que a gama completa dos parâmetros foram sujeitas a amostragem, com a precisão de um *design* OAT, assegurando que as alterações na saída de cada execução do modelo podem ser atribuídas ao parâmetro que foi alterado sem haver ambiguidades (Griensven *et al.*, 2006).

O método do Hipercubo Latino foi desenvolvido usando como base a simulação de Monte-Carlo, diferenciando-se deste pela utilização de um método que realiza a amostragem estratificada permitindo uma estimativa mais eficiente das estatísticas dos parâmetros de

saída. O método subdivide a distribuição de cada parâmetro em “N” intervalos, cada qual com a probabilidade de ocorrência igual a 1/N. Os valores aleatórios dos parâmetros são gerados de forma que cada série é amostrada apenas uma única vez, então, o modelo é executado “N” vezes com a combinação aleatória dos parâmetros (Griensven, 2007).

Para o método OAT, somente os parâmetros de entrada são alterados durante os *loops* que o modelo realiza na análise. Em cada rodada apenas um parâmetro é modificado por vez, dessa forma com as mudanças no resultado em cada rodada o modelo pode encontrar a solução para as ambiguidades que são atribuídas ao parâmetro de contribuição que foi alterado (Griensven, 2007).

De acordo com Griensven *et al.* (2006) o método LH-OAT opera por *loops*, cada *loop* começa com um ponto LH, em torno de cada LH ponto  $j$ , um efeito parcial  $S_{i,j}$  para cada parâmetro  $e_i$  é calculado como porcentagem (Eq. 5):

$$S_{i,1} = \left| \frac{M\left(\frac{e_1, \dots, e_i * (1+f_i), \dots, e_p}{e_1, \dots, e_i * (1+f_i), \dots, e_p}\right) - M(e_1, \dots, e_i, \dots, e_p)}{f_i} \right| \quad \text{Eq. 5}$$

onde:

$M(.)$  refere-se às funções do modelo,  $f_i$  é a fração de cada parâmetro  $e_i$  (uma constante pré-definida) que é alterada,  $e_i = \{e_1, e_2 + \dots + e_p\}$  refere-se ao conjunto de  $P$  parâmetro, e  $j$  refere-se a um ponto *Latin Hypercube*. O efeito final é calculado como sendo a média desses efeitos parciais para cada ciclo e para cada ponto *Latin Hypercube*, conseqüentemente  $N$  ciclos.

O número de simulações realizadas pelo LH-OAT é calculado por (Eq. 6):

$$NS = N * (P + 1) \quad \text{Eq.6}$$

O resultado de cada simulação da análise de sensibilidade pode ser comparado com o *output* produzido pelo modelo da variável de interesse do usuário ou com dados observados. Quando o resultado é comparado com o *output* produzido pelo modelo, os valores podem ser comparados com a média ou com valores limites de referência como a vazão mediana, ou vazão mínima. Quando o resultado é comparado com dados observados utilizam-se as funções objetivo Soma do Quadrado dos Resíduos (SSQ) e a Soma do Quadrado dos Resíduos Ranqueada (SSQR) (Salles, 2012).

## 2.7 Calibração

A calibração ou estimativa de parâmetros é o ajuste dos parâmetros do modelo, situação fictícia, para uma condição ideal, situação real (Lopes, 2008). Para Tucci *et al.* (2007), a calibração é uma técnica de otimização na qual os valores dos parâmetros de um modelo hidrológico são modificados pelo usuário ou através de uma técnica numérica, com o objetivo de encontrar uma boa concordância entre os valores calculados (simulados) e os valores observados das variáveis de saída (por exemplo, a vazão nos rios).

O primeiro passo de uma calibração é dividir os valores medidos em duas séries temporais, sendo uma para calibração e outra para validação. Na calibração, os dados de entrada são ajustados até que se obtenha uma resposta satisfatória de saída. Uma vez realizado tal procedimento, o modelo é executado usando os mesmos parâmetros de entrada para o período de validação (Arnold *et al.*, 2000).

O período utilizado para a calibração deve abranger de grandes cheias a estiagens prolongadas, tendo em vista o objetivo da simulação de séries contínuas de vazão, fornecendo ao modelo condições de simular adequadamente a maior amplitude possível de vazões (Durães, 2010).

A calibração pode ser automática realizada usualmente após a análise de sensibilidade, que gera um conjunto de arquivos com as informações que serão utilizadas no processo de autocalibração (Griesven, 2007), ou realizada manualmente.

A calibração manual consiste em alterar os valores dos parâmetros de entrada no modelo para produzir valores simulados que estão dentro de um determinado intervalo dos dados medidos (Balascio *et al.*, 1998 *apud* Moriasi *et al.*, 2007).

Os parâmetros são alterados individualmente, então executa-se o modelo para verificar as mudanças nos valores de saída, o processo é repetido até se chegar a um valor aceitável que se aproxime dos valores medidos (Neitsh *et al.*, 2005b).

A calibração automática é baseada em algoritmos de otimização, a otimização é a busca do valor de uma variável ou de  $n$  variáveis, que proporcionem o melhor resultado para uma função dependente destas variáveis, dentro de um objetivo e obedecidas restrições (Tucci, 1998).

Um procedimento típico para estimar os valores de parâmetros de modelos chuva-vazão considera a função-objetivo, o algoritmo de otimização e o critério de parada. Uma função-objetivo é uma medida de desempenho do problema analisado. No caso da calibração de modelos chuva-vazão, a função-objetivo é uma equação utilizada para calcular uma

medida numérica da diferença (erro) entre os resultados do modelo (geralmente um hidrograma) e os valores observados dessa mesma variável de saída. Dessa forma, o propósito da calibração automática é encontrar aqueles valores dos parâmetros do modelo que otimizam (maximizam ou minimizam) a função-objetivo (Bravo *et al.*, 2007).

A calibração manual requer entendimento de detalhes do modelo, que são obtidos somente depois de anos de experiência com calibração de modelos, além de despende muito tempo e ser um processo moroso, em contrapartida tem a vantagem de poder incorporar o conhecimento e experiência do modelador (Duan *et al.*, 1994; Bravo *et al.*, 2007). Já a calibração automática se destaca por ser um processo rápido, não agregar tanta subjetividade e implementar processos de otimização.

A calibração do modelo deve seguir uma ordem, primeiro processos hidrológicos, depois aporte de sedimentos e na sequência qualidade da água (Griesven, 2007). Santhi (2001) e Moriasi *et al.* (2007) sugerem que a calibração deve ser realizada sequencialmente começando pelo escoamento superficial, assim que esse esteja ajustado deve-se passar para o próximo componente, assim até se calibrar todas as componentes modeladas (Figura 4).

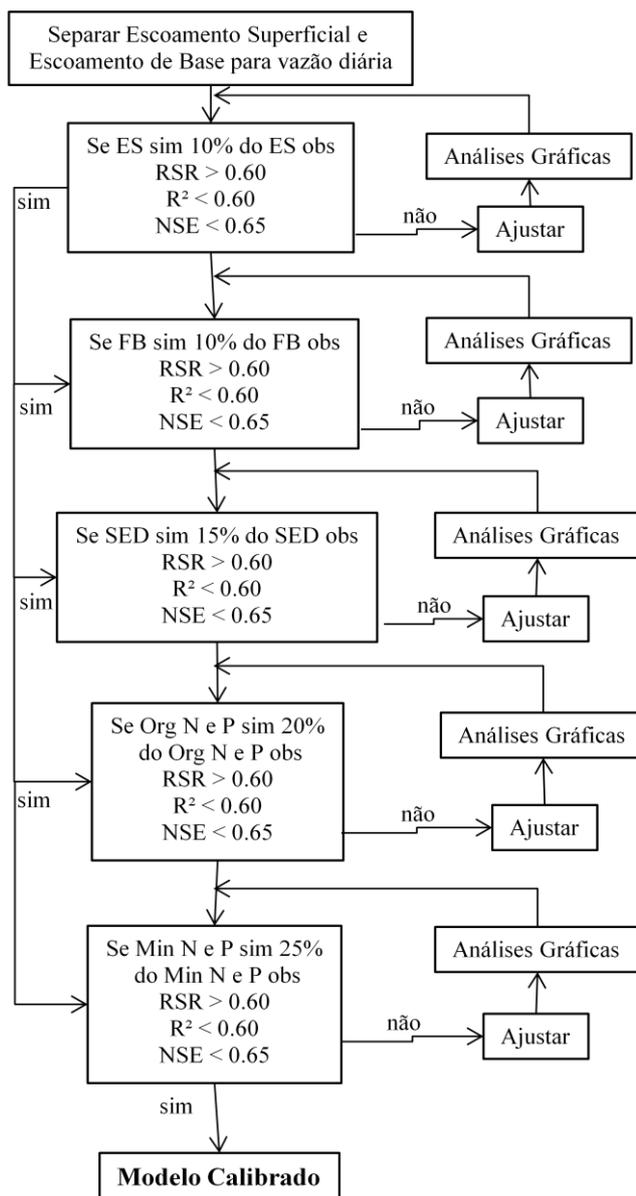


Figura 4: Procedimento de Calibração para Fluxo, Sedimentos e Nutrientes (adaptado de Santhi, 2001 e Moriasi, 2007).

Santhi (2001) definiu para a calibração do escoamento superficial e do fluxo de base valores de 0.60 e 0.65 para os índices de eficiência de Nash e Sutcliffe (ENS) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) respectivamente, e considerou que os valores simulados deveriam ser de aproximadamente 10% dos observados. Os índices de eficiência foram os mesmos para os demais componentes analisados variando apenas para a porcentagem dos valores simulados em relação aos observados, para sedimentos foi estipulado 15%, P e K orgânicos 20% e N e P minerais 25%.

Moriasi *et al.* (2007) desenvolveu um estudo com os diferentes métodos para análise da modelagem hidrológica, explicando cada um desses métodos e definindo uma classificação, que abrange os mais utilizados e os que mais se adequam para a análise de

determinados modelos. De acordo com esse estudo os resultados dos modelos podem ser classificados conforme a Tabela 2, para o modelo SWAT.

Tabela 2: Classificação dos resultados por índice de eficiência para a modelagem com o SWAT para estimativas mensais (Adaptado de Moriasi *et al.*, 2007).

<b>Classificação</b>	<b>RSR</b>	<b>ENS</b>	<b>PBIAS</b>
Muito Bom	$0,00 \leq \text{RSR} \leq 0,50$	$0,75 < \text{Ens} \leq 1,00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$
Bom	$0,50 \leq \text{RSR} \leq 0,60$	$0,65 < \text{Ens} \leq 0,75$	$\pm 10 < \text{PBIAS} < \pm 15$
Satisfatório	$0,60 \leq \text{RSR} \leq 0,70$	$0,50 < \text{Ens} \leq 0,60$	$\pm 15 < \text{PBIAS} < \pm 25$
Insatisfatório	$\text{RSR} \geq 0,50$	$\text{Ens} \leq 0,50$	$\text{PBIAS} > \pm 25$

RSR- Razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão das observações; ENS- Índice de Nash e Sutcliffe; Percentual de Tendência-PBIAS.

Os valores definidos por Santhi (2001) e Moriasi *et al.* (2007), são considerados para modelos que utilizem dados mensais para a modelagem. Green e Griesven (2008) consideraram que para uma calibração com dados diários valores de ENS superiores a 0,4 e  $R^2$  superiores a 0,5 são considerados satisfatórios para a simulação.

O modelo calibrado deve ser executado com os mesmos parâmetros de entrada para o período de validação e um ajuste é determinado. Depois do modelo calibrado este deve ser validado para situações semelhantes as quais se quer aplicá-lo. Os resultados da validação indicam se o modelo foi capaz de reproduzir a série de dados que foi desconsiderada no período de calibração (Gassman *et al.*, 2003).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta sessão inicia-se com a caracterização da bacia do alto rio Jardim, apresentando sucintamente as principais características fisiográficas e sua relação com fatores (tais como clima, relevo, solos, usos, geologia, geomorfologia) importantes para a compreensão dos processos físicos envolvidos no ciclo hidrológico. Também são apresentadas as formas de obtenção dos dados de entrada e definição dos parâmetros para os dados utilizados na modelagem hidrológica pelo modelo SWAT. Por último são apresentados os programas e procedimentos adotados para a execução da modelagem hidrológica na bacia do alto rio Jardim.

#### 3.1 Características Fisiográficas da Área de Estudo

A bacia experimental do alto rio Jardim está localizada entre as coordenadas 8.261.982,8 e 8.244.719,5S e 216.293,4 e 226.613,2W, ocupa uma área de aproximadamente 105 km<sup>2</sup>, e encontra-se na porção leste do Distrito Federal, inserida na Bacia do Rio Preto, sua distância em relação ao centro de Brasília é de aproximadamente 50 km (Figura 5).

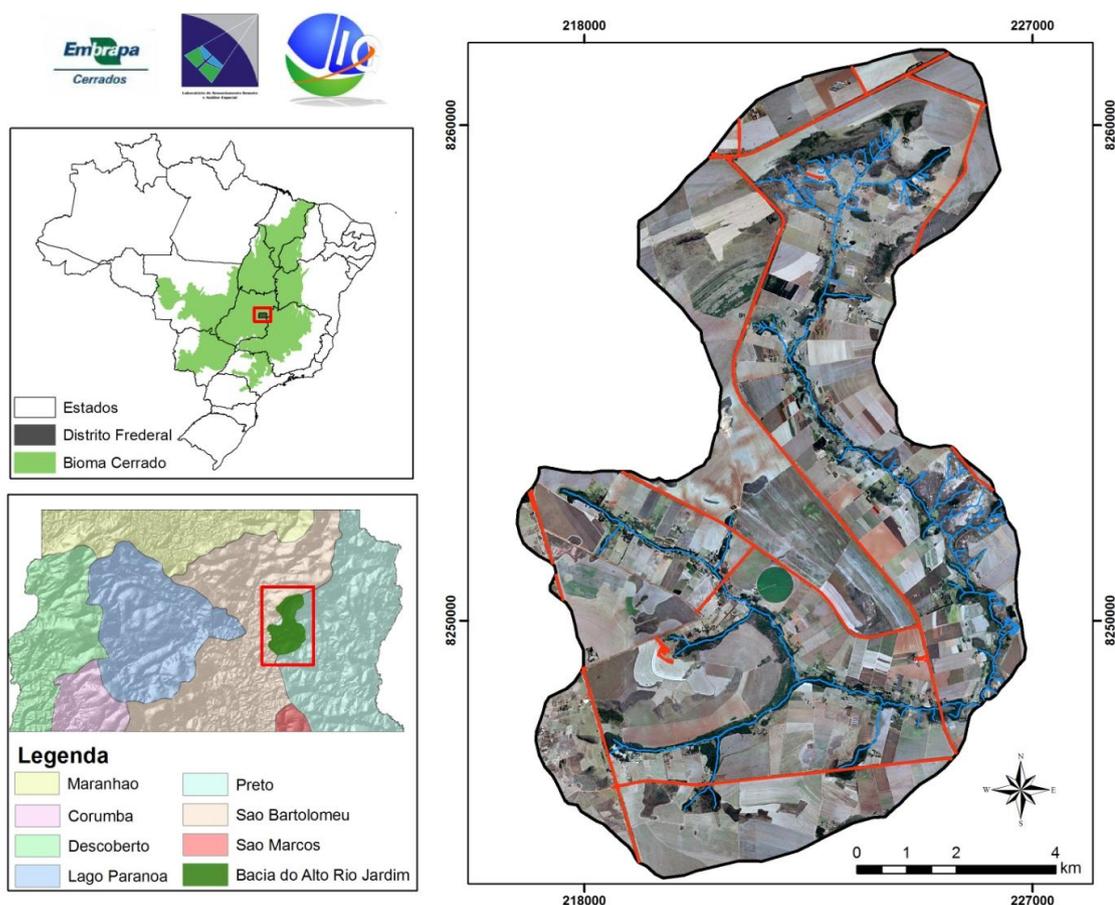


Figura 5: Localização da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim.

O rio Jardim é o principal canal tributário da bacia do rio Preto, depois de desaguar no rio Preto suas águas seguem pelo rio Paracatu até desaguar no rio São Francisco (Dolabella, 1996; Spera, 2002). A área total da drenagem na bacia (Figura 6), é de 104,86 km<sup>2</sup>, dividida em duas bacias principais, a do córrego Estanislau contribuindo com 49,71 km<sup>2</sup> e a do rio Jardim com 55,15 km<sup>2</sup> (Lima, 2010).

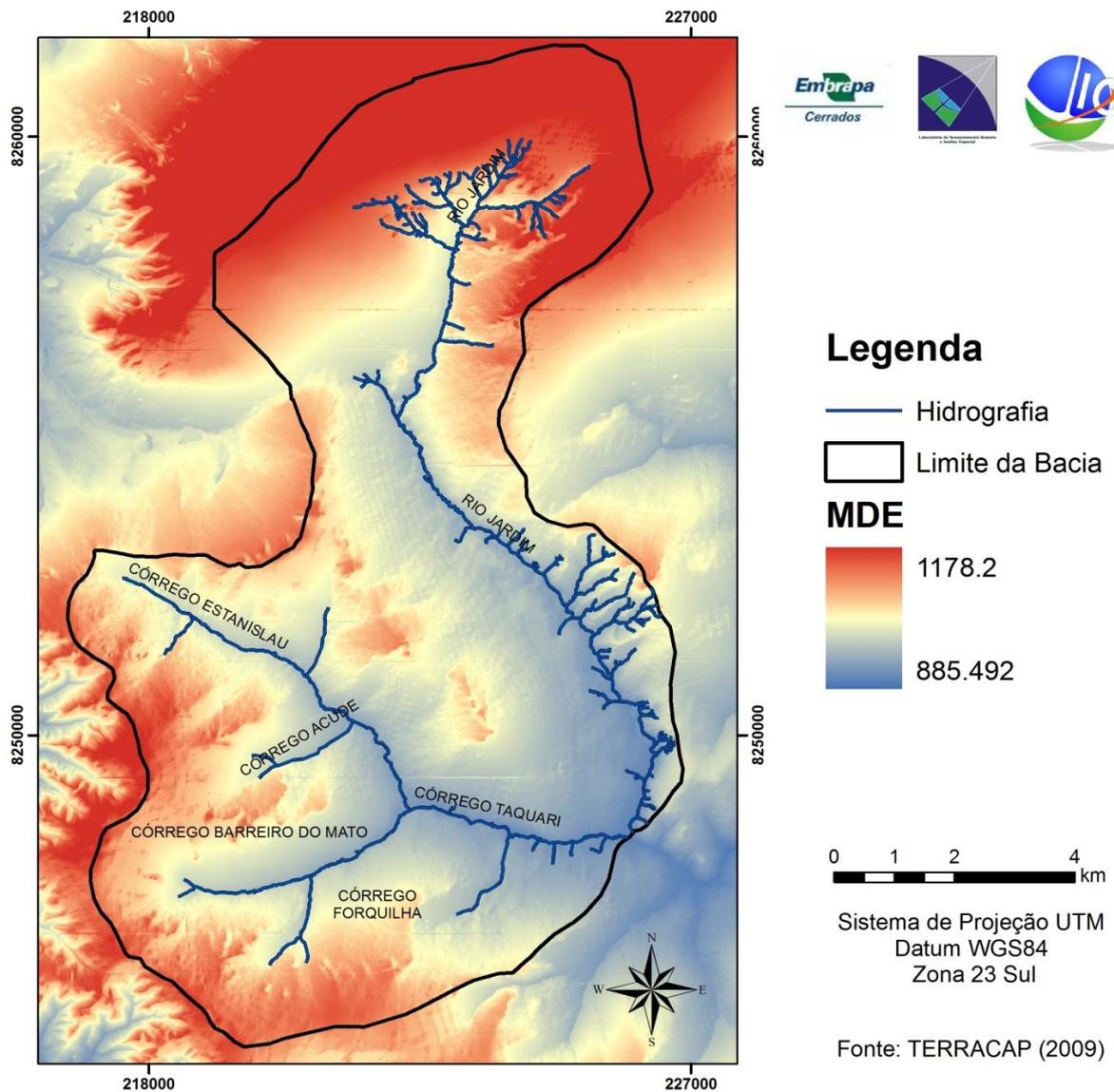


Figura 6: Rede de Drenagem e Modelo Digital de Elevação da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim.

O clima na bacia do alto Jardim é característico da região de cerrado. Conforme a classificação de Köppen é Tropical de Savana com verão chuvoso e inverno seco. Os meses chuvosos compreendem o período de outubro a março e a estação seca se prolonga desde o mês de abril até o mês setembro.

A precipitação média anual na área varia aproximadamente entre 1.000 e 1.700 mm. Na estação chuvosa ocorrem 90% do total anual de pluviosidade, com o mês de janeiro apresentando o maior índice pluviométrico, cerca de 240 mm, já na estação seca a média mensal da pluviosidade não ultrapassa os 60 mm (Godoy & Lopes-Assad, 2002; Lima, 2010; Chaves, 2011).

A região de estudo está dentro da faixa intertropical, o que lhe garante um regime térmico médio do tipo tropical, que oscila entre 19° e 22° C, sendo que no mês mais frio a temperatura média é inferior aos 18°C (Frota, 2006).

De acordo com o mapeamento desenvolvido por Campos & Freitas Silva (1998) a bacia do alto rio Jardim se desenvolveu sobre as rochas dos grupos Paranoá, Canastra e Bambuí (Figura 7). Quanto a Geomorfologia, predominam terrenos planos (53% da área) e suave ondulados (43%), principalmente na parte oeste da bacia e nas áreas de interflúvios (Godoy & Lopes-Assad, 2002).

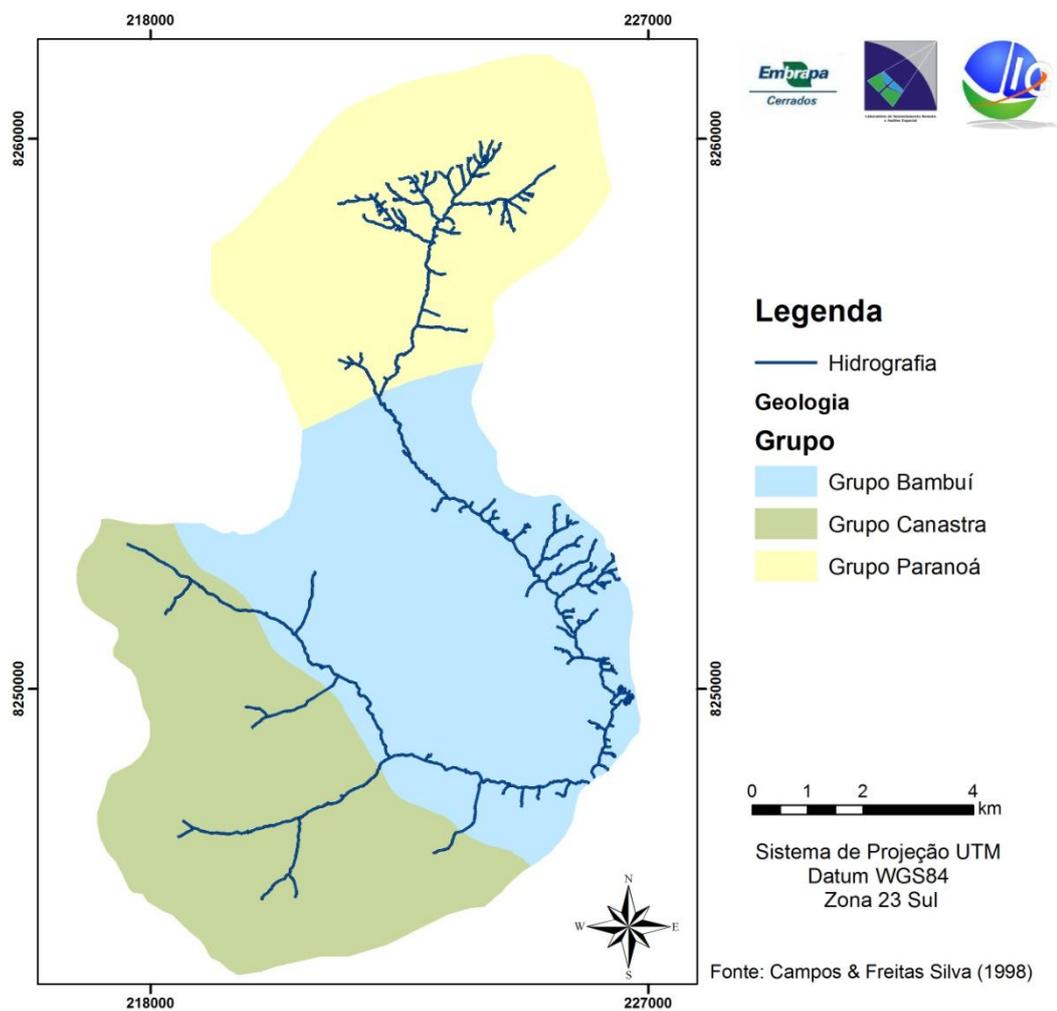


Figura 7: Geologia da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim.

A hidrogeologia na bacia é representada por dois domínios, um fraturado e outro poroso (Campos & Freitas Silva, 1998). O primeiro é composto pelas unidades P1, P2 e P4 do Domínio Poroso (Figura 8) e o segundo pelos sistemas Canastra, Bambuí e Paranoá, incluindo os subsistemas Q3/R3 e R4, do Domínio Fraturado (Figura 8).

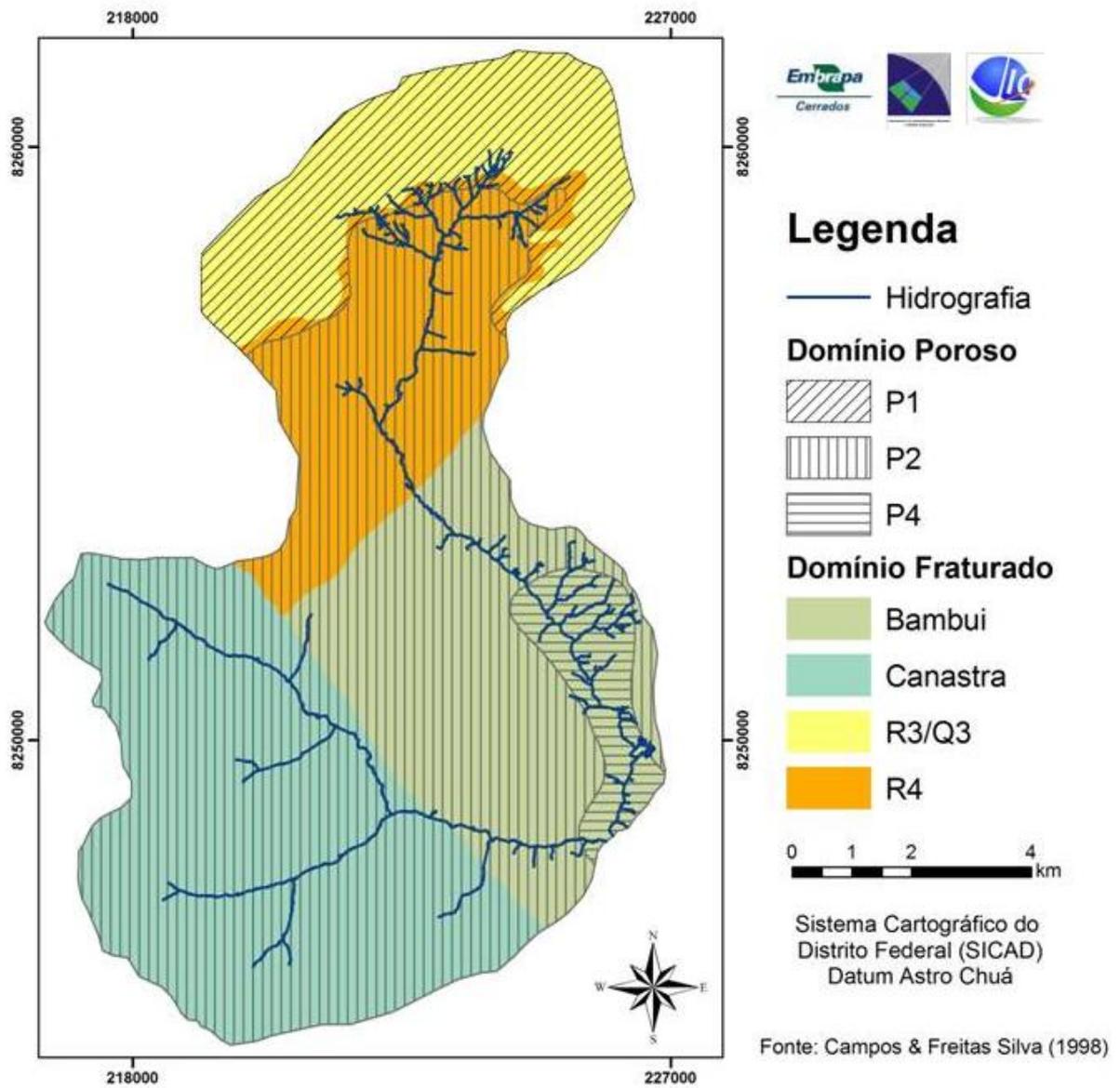


Figura 8: Domínio Poroso e domínio Fraturado da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim.

A pedologia da área de estudo foi caracterizada por Reatto *et al.* (2000), escala 1:50.000 (Figura 9).

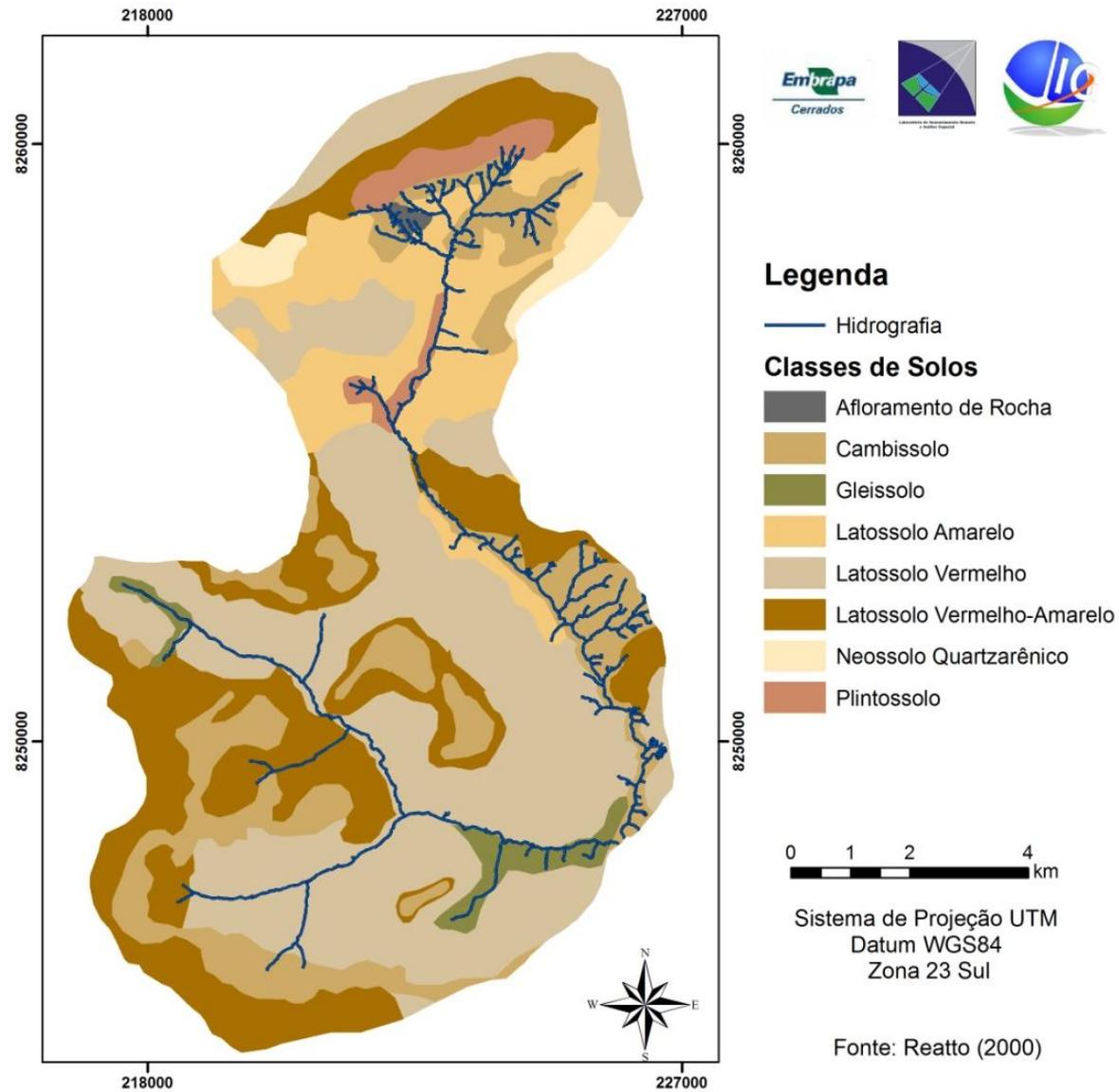


Figura 9: Mapa de Solos da Bacia do Alto Rio Jardim

A maior parte da bacia é composta pelos Latossolos, as principais classes são os Latossolos Vermelhos (41,19%), Latossolos Amarelos (11,94%), Latossolos Vermelho-amarelos (23,18%), estando presentes principalmente em áreas de relevo plano a suave ondulado. Morfologicamente são solos minerais, não hidromórficos e com horizonte B espesso. Possuem teor de argila, variando entre 38% e 75%, e são solos acentuadamente drenados a bem drenados, com alta permeabilidade de água (Reatto *et al.*, 2002).

Os Cambissolos representam 16,74% do total da bacia, presentes geralmente em áreas de relevo suave ondulado com declividades entre 3% e 8%. São solos com baixo grau de intemperismo, possuem horizonte B insipiente com presença de minerais primários facilmente intemperizáveis, e seu teor de argila varia entre 46% e 63% (Reatto *et al.*, 2002).

Os Gleissolos (2,30%) são solos hidromórficos que ocupam geralmente as depressões da paisagem, sujeitas a inundações. Oscilam de imperfeitamente drenado, mal drenado à muito mal drenado. Com frequência apresentam uma espessa camada escura de matéria orgânica mal decomposta sobre uma camada acinzentada (gleizada), resultante de ambiente de oxirredução. São solos pouco desenvolvidos, com presença de lençol freático próximo à superfície durante a maior parte do ano, e seu teor de argila varia entre 48% e 53% (Reatto *et al.*, 2002).

Os Plintossolos estão presentes em 2,43%, são solos minerais hidromórficos, com séria restrição à percolação de água, frequentemente encontrados em áreas de alagamento temporário e escoamento lento. Na bacia ocorrem em relevo plano e suave-ondulado, em áreas deprimidas e nos terços inferiores da encosta onde há importante movimentação lateral de água. Apresenta um horizonte com presença de plintita ou petroplintita, possui limitações em relação a permeabilidade. São solos imperfeitamente drenados e com teor de argila em torno de 25% (Reatto *et al.*, 2002).

Os Neossolos Quartzarênicos constituem 1,99% do terreno da bacia, são solos profundos, com textura arenosa ou franco-arenosa, constituídos essencialmente de quartzo, com máximo de 15% de argila e seqüência de horizontes do tipo A-C. Estão relacionadas a sedimentos arenosos de cobertura e à alterações de rochas quartzíticas e areníticas, sendo encontrados em relevo plano ou suave-ondulado. Apresentam ainda alta porosidade e se caracterizam como solos excessivamente drenados (Reatto *et al.*, 2002).

Com relação à textura dos solos (Figura 10) a maior parte da bacia é composta por solos argilosos, uma porção apresenta solos muito argilosos ou de textura média e há ainda uma pequena presença de solos arenosos e afloramento de rocha (Lima, 2010).

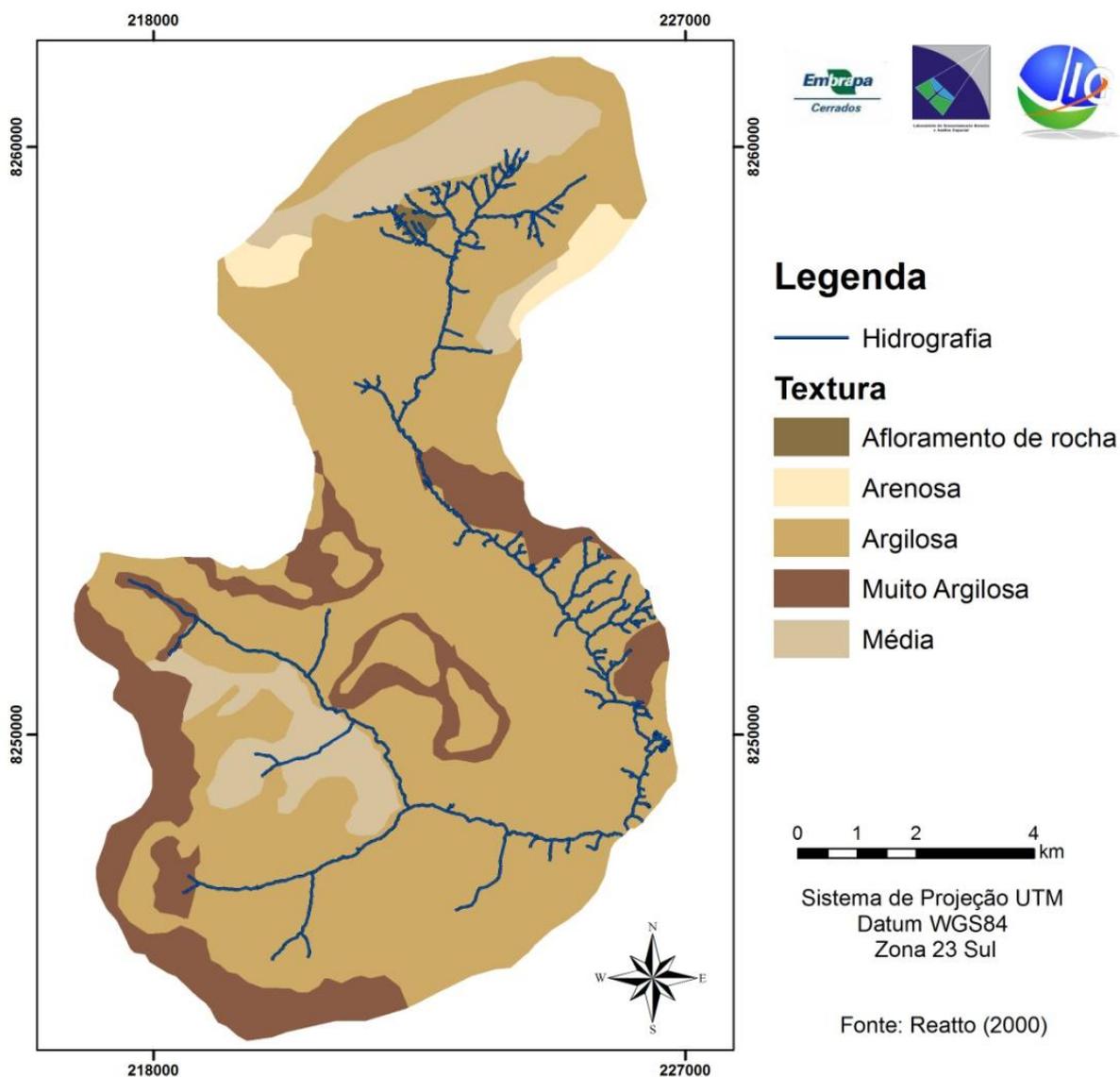


Figura 10: Textura dos Solos da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim.

A bacia em estudo está inserida no domínio fisiográfico do cerrado, segundo maior bioma brasileiro. A bacia do rio Jardim ocupa uma região onde a paisagem natural sofreu intensas transformações com a ocupação do solo pelas atividades agrícolas, principalmente durante a década de 80, com a entrada das culturas extensivas e irrigadas (Frota, 2006).

Com a ocupação da bacia do alto rio Jardim pelas atividades agrícolas e pecuárias o seu cenário natural foi sendo gradativamente substituído. Atualmente a bacia possui quase que a totalidade de seus usos voltados para a agricultura, restando apenas pequenas porções de cerrado, campo e matas de galeria margeando o curso dos rios.

Historicamente a ocupação territorial da bacia do Rio Preto tem sido reservada para a implementação da agropecuária, por esse motivo não existe na bacia áreas caracterizadas como urbanas ou unidades de conservação (Frota, 2006).

O Núcleo Rural Jardim contribui com aproximadamente 26% da produção total do Distrito Federal. Na bacia do rio Jardim a produção de grãos é a atividade econômica mais desenvolvida, onde o milho é uma das principais culturas, seguido da soja e do feijão. As hortaliças também são produzidas em grande escala, assim como a fruticultura, que apresenta entre os produtos agrícolas mais produzidos a banana, o limão e a manga. A região é a segunda maior em termos de produção pecuária no Distrito Federal, com destaque para a avicultura, a suinocultura e a bovinocultura (Frota, 2006).

### 3.2 Modelo Conceitual

O modelo SWAT necessita discretizar as informações pedológicas. As informações referente aos mapas (X,Y) são discretizadas por meio das classe de solo ao passo que, os dados de perfis (Z) em camadas admitindo como limite máximo, a profundidade de 350 cm. Deste modo, o modelo conceitual para a bacia do alto rio Jardim foi construído tendo como base os dados pedológicos extraídos da tese de doutorado de Lima (2010).

Foram consideradas três profundidades para as camadas de solos (Figura 11), sendo as duas primeiras fixas para todos os tipos de solos e a terceira variável em relação à classe de solo. A primeira camada vai desde a superfície do solo até 30 cm de profundidade. A segunda camada vai da profundidade de 30 cm até 100 cm. A terceira camada é variável para cada tipo de solo indo de 100 cm até o limite máximo, como demonstrado abaixo:

- Latossolos até 350 cm;
- Gleissolo até 200 cm;
- Plintossolo até 300 cm;
- Neossolo Quartzarênico até 350 cm e;
- Cambissolo até 100 cm (não constando para a ultima camada).

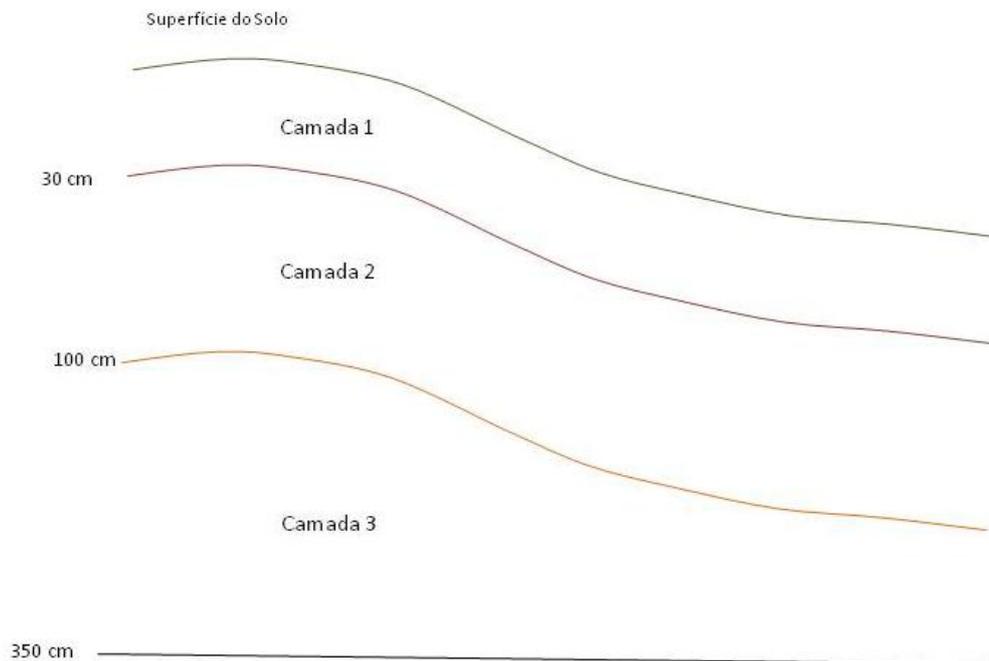


Figura 11: Modelo conceitual da Bacia do Alto Rio Jardim.

A primeira camada permite aferir o comportamento superficial dos solos, enquanto a segunda camada é a profundidade do horizonte diagnóstico do solo, onde a partir dela pode se fazer uma generalização da classe de solo para o perfil (Embrapa, 2006).

Foram utilizados os dados de solos referentes as profundidades 15 cm e 60 cm levantados por Lima (2010). Para os valores de condutividade hidráulica as medições foram realizadas até o nível do lençol freático. Dessa forma os dados correspondentes a 15 cm, foram atribuídos para a primeira camada e os dados de 60 cm para a segunda e terceira camadas, excluindo o dado de condutividade que para a terceira camada foi agregado o dado medido até o nível do lençol freático.

### 3.3 Aplicativos e Organização da Base

A estimativa do ciclo hidrológico foi desenvolvida através de um modelo hidrológico acoplado a um software de GIS. Para a realização dos diversos processos atrelados a modelagem foram utilizados os seguintes programas:

- ArcGIS 9.3 com a extensão ArcGIS *SpatialAnalyst* desenvolvido pela *Environmental Systems Research Institute (ESRI)*, Redlands, CA, EUA;

- ArcGISArc-SWAT 9.3.7a, versão 2009, desenvolvido pela *Enviromental Stone* em colaboração com *Texas A&M SpatialSciencesLaboratory*, *BlacklandResearch* e *Extension Center*;
- Google Earth, versão 7.0.3.8542, desenvolvido pela *Google Company*;
- Microsoft Office Excel 2007, desenvolvido pela *Microsoft* para o sistema operacional *Windows* ou *Macintosh Apple Inc*;
- SWAT Check, versão 1.0, para o SWAT 2009, desenvolvido pela *Enviromental Stone* em colaboração com *Texas A&M Spatial Sciences Laboratory*, *Blackland Research* e *Extension Center*;

### 3.4 Parametrização dos Dados de Entrada

As limitações básicas para a utilização de um modelo hidrológico estão atreladas principalmente a qualidade e a quantidade dos dados hidrológicos, além da dificuldade de formular matematicamente alguns processos e simplificações do comportamento espacial de variáveis e fenômenos. Quanto menores o número de variáveis de entrada, maiores serão as incertezas dos prognósticos, os dados permitem aferir os parâmetros e reduzir as incertezas dos mesmos na estimativa das variáveis hidrológicas (Tucci, 1998).

De acordo com Tucci (1998) a quantidade e a representatividade das informações para ajuste e verificação de um modelo hidrológico é fundamental para permitir um resultado de qualidade, esta é a diferença entre buscar um resultado confiável e estar somente na magnitude dos dados esperados.

O componente hidrológico do modelo SWAT inclui sub-rotinas do escoamento superficial, percolação, fluxo lateral sub-superficial, fluxo de retorno do aquífero raso e evapotranspiração (Neitsch *et al.*, 2005a,b). Para a execução rigorosa das equações, os dados de entrada necessários são bastante detalhados (Bekiaris *et al.*, 2005).

Para descrever a relação entre as variáveis de entrada e saída, o modelo requer dados diários de precipitação, temperaturas máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa, e dados das propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de gestão do uso da terra ocorrentes na bacia (Neitsch *et al.*, 2005a). Os processos físicos são modelados diretamente pelo SWAT através destes dados de entrada (Neitsch *et al.*, 2005a).

O modelo SWAT possui uma base de dados com todas as características necessárias para realizar as simulações acopladas, porém os dados são referentes a bacias estudadas nos Estados Unidos, que em grande parte dos casos não se adéquam a outras realidades. No Brasil

tais informações são escassas ou de difícil acesso com maior nível de detalhe, em especial para o cerrado.

Dessa forma, uma das etapas de trabalho é a aquisição e organização dos dados de entrada necessários para suprir o modelo de acordo com a realidade da bacia analisada, e dessa forma estabelecer parâmetros adequados para a utilização do modelo, para que a modelagem possa ser realizada de forma consistente.

#### 3.4.1 Modelo Digital de Elevação

O Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado para a representação espacial da variação altimétrica da bacia foi gerado por meio de técnica de interpolação a partir das curvas de nível com distância vertical de 5 metros, pontos cotados e da rede de drenagem topologicamente corrigida na escala de 1:10.000 disponibilizados pela TERRACAP (TERRACAP, 2010).

A ferramenta Topo To Raster, disponível do ArcGis 9.3, foi utilizada para a geração do MDE com um pixel de 15 cm para minimizar os ruídos produzidos no processo. Esta ferramenta foi projetada especificamente para a criação de modelos digitais de elevação (DEM) hidrológicamente consistentes. Ela baseia-se no programa ANUDEM desenvolvido por Hutchinson (1988, 1989, 1996, 2000, 2008). A evolução dos ANUDEM são discutidos em Hutchinson *et al.* (2009 e 2011). A versão atual do ANUDEM usado em ArcGIS é de 5,3.

Após a geração do MDE foi realizada uma análise de consistência para remover os erros oriundos da interpolação e remover os erros das depressões fechadas que interrompem o escoamento na rede hidrográfica, para garantir que o mesmo esteja hidrológicamente corrigido. Todas as ferramentas utilizadas estão disponíveis no *Arctoolbox* do *software* Arcgis denominadas *Hydrology*.

#### 3.4.2 Solos

O mapa de solos utilizado foi o levantamento semidetalhado (escala 1:50000) da bacia do rio Jardim (Figura 9), realizado por Reatto *et al.* (2000), onde os tipos de solos existentes estão descritos no item 3.1. A seguir serão descritas as características dos solos necessárias para utilizar o SWAT.

### 3.4.3 Características físicas dos solos

O Swat requer uma série de dados a cerca das características físicas dos solos para poder realizar as simulações hidrológicas. Os parâmetros necessários a simulação são tipo de solo, profundidade da camada de solo, grupo hidrológico de solo, densidade, porosidade, condutividade hidráulica saturada, capacidade de água disponível, teor de carbono, areia, argila, silte e rocha, profundidade de raiz, potencial de fraturamento do solo, albedo e erodibilidade (Neitsch *et al.*, 2005b).

Para agrupar os solos de acordo com as características hidrológicas foi utilizada a classificação apresentada por Sartori (2004) para os solos da região sudeste do Brasil. O autor agrega as classes de solos em quatro grupos hidrológicos distintos (A, B, C e D), sendo que na bacia não há presença de solos que se enquadrem no grupo C (Quadro 2).

Quadro 2: Grupo de Solos Hidrológicos da Bacia do Alto Rio Jardim (adaptado de Sartori 2004).

Classe de Solo	Grupo Hidrológico	Características
Latossolo Vermelho-Amarelo	A	Compreende os solos com baixo potencial de escoamento, contendo alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados, consistindo principalmente de areias ou cascalhos, ambos profundos e excessivamente drenados. Estes solos têm uma alta taxa de transmissão de água (taxa mínima de infiltração: > 7,62 mm/h).
Latossolo Vermelho		
Latossolo Amarelo		
Neossolo		
Cambissolo	B	Compreende os solos contendo moderada taxa de infiltração quando completamente molhados, consistindo principalmente de solos moderadamente profundos a profundos, moderadamente a bem drenados, com textura moderadamente fina a moderadamente grossa. Estes solos possuem uma moderada taxa de transmissão de água (taxa mínima de infiltração: 3,81-7,62 mm/h).
Gleissolo	D	Compreende os solos que possuem alto potencial de escoamento, tendo uma taxa de infiltração muito baixa quando completamente molhados, principalmente solos argilosos com alto potencial de expansão. Pertencem a
Plintossolo		

Afloramento de rocha	Este grupo, solos com uma grande permanência do lençol freático, solos com argila dura ou camadas de argila próxima da superfície e solos expansivos agindo como materiais impermeabilizantes próximos da superfície. Estes solos têm uma taxa muito baixa de transmissão de água (taxa mínima de infiltração: 0 - 1,27 mm/h).
----------------------	--

Os dados referentes a densidade, porosidade, capacidade de água disponível, teor de carbono, areia, argila e silte foram aferidos em campo por Lima (2010). Como o modelo SWAT discretiza os dados por classe de solos, foi realizada uma análise estatística dos dados pontuais (Lima, 2010) para cada parâmetro. Na tabela 3 são apresentadas as médias para cada parâmetro por classe de solo, onde estas foram usadas para a discretização por classe de solo.

Tabela 3: Valores médios dos parâmetros de solos medidos (Lima, 2010).

<b>Parâmetros</b>	<b>Camada (cm)</b>	<b>LVA</b>	<b>LA</b>	<b>LV</b>	<b>Cx</b>	<b>Gx</b>	<b>Fx</b>
Porosidade	15	0.57	0.55	0.58	0.56	0.56	0.54
	60	0.57	0.58	0.58	0.57	-	-
Densidade	15	0.94	1.02	0.94	1.00	0.86	1.00
	60	0.96	0.94	0.95	1.00	-	-
Disponibilidade de água no solo	15	0.11	0.12	0.12	0.12	0.14	0.16
	60	0.12	0.11	0.13	0.16	-	-
Teor de carbono orgânico	15	1.11	1.31	1.40	1.34	0.81	2.04
	60	0.73	1.01	0.86	1.00	-	-
Teor de argila	15	57.41	51.96	57.56	49.36	51.59	35.84
	60	64.09	50.80	63.21	46.73	63.85	61.47
Teor de silte	15	24.56	20.04	28.43	28.87	28.54	16.33
	60	20.87	28.31	24.86	28.26	13.42	9.67
Teor de areia	15	18.03	28.00	14.02	21.77	19.86	47.83
	60	15.04	20.88	11.93	25.01	22.72	28.87

LVA - Latossolo Vermelho-amarelo; LA -Latossolo Amarelo; LV - Latossolo Vermelho; Cx - Cambissolo; Gx - Gleissolo; Fx - Plintossolo.

Para os valores de albedo foi utilizado como referência os valores adaptados de Baldissera (2005). Os dados profundidade de raiz e teor de rocha, não tiveram valores

agregados, e para a informação de potencial de fraturamento admitiu-se um valor de 0,5 que é o *default* (valor de referência padrão) do modelo. Para o parâmetro profundidade de raiz quando não há valor agregado o modelo considera que esta se estende por todo o perfil.

Os valores de condutividade hidráulica saturada utilizados também foram os valores medidos por Lima (2010), correspondentes aos valores médios por classe de solo, obtidos através da aferição em campo para a bacia do alto rio Jardim (Tabela 4).

Para a classe dos neossolos quartzarênicos não havia dados disponíveis obtidos diretamente da bacia do rio Jardim. Deste modo, os dados utilizados são pertencentes a base de dados da EMBRAPA, referentes aos solos do cerrado (Lima, comunicação verbal). Foram então selecionados pontos de áreas com características semelhantes a da bacia, e depois realizada uma média desses dados para os diferentes parâmetros.

Tabela 4: Valores de Condutividade Hidráulica Saturada (Lima, 2010).

Classe de solos	Profundidade								
	15 cm			60 cm			Lençol Freático		
	Ks $10^{-4} \text{ m. s}^{-1}$	CV (%)	Nº Pontos	Ks $10^{-4} \text{ m. s}^{-1}$	CV (%)	Nº Pontos	Ks $10^{-4} \text{ m. s}^{-1}$	CV (%)	Nº Pontos
Latossolo-Vermelho	2.011	223.4	21	1.227	501	18	0.914	84.9	19
Latossolo-Vermelho - Amarelo	3.123	51.1	16	1.213	758.7	16	2.005	141.8	16
Latossolo-Amarelo	7.229	-	1	1.404	-	1	0.519	-	1
Cambissolo	2.484	61.6	8	0.752	126.3	6	0.317	64.6	9
Gleissolo	1.373	-	1	-	-	-	1.092	-	2
Plintossolo	3.054	-	1	-	-	-	2.337	-	2

Após a compilação dos dados, foram verificadas as unidades de medidas dos parâmetros utilizados e estes foram convertidos para as unidades utilizadas pelo SWAT, quando necessário. Ao final dessa etapa os dados foram inseridos no banco de dados, de acordo com o padrão de armazenamento da base de dados do SWAT.

### 3.4.4 Uso do solo

A figura 12, apresenta os procedimentos efetuados para a elaboração do mapa de uso e ocupação do solo.

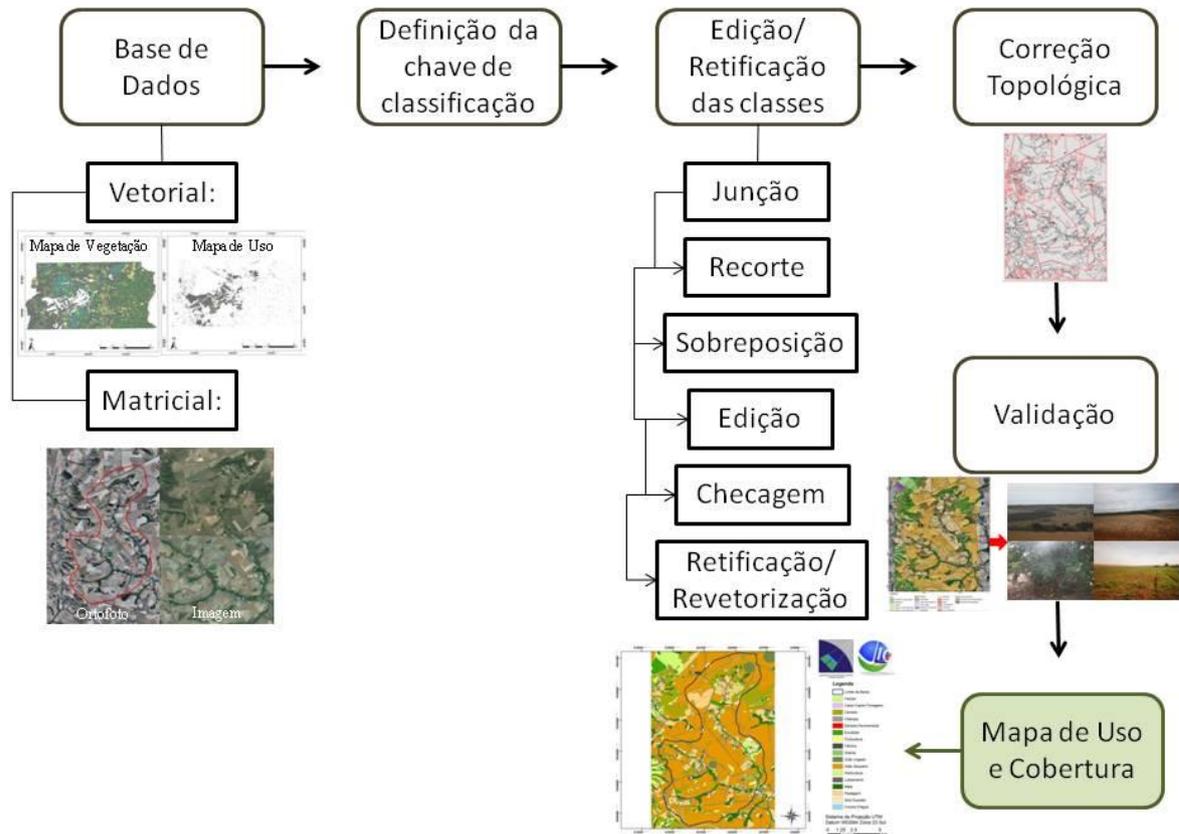


Figura 12: Fluxograma metodológico para a elaboração do mapa de uso e ocupação da Bacia do Alto Rio Jardim

Foram utilizadas as ortofotos referentes ao mapeamento do Distrito Federal para o ano de 2010, realizado pela TERRACAP (Companhia Imobiliária de Brasília), com resolução espacial de 1 metro. Para a geração das imagens finais foram utilizadas quatro bandas, sendo três do intervalo espectral visível (RGB) e uma do infravermelho próximo. Para dar suporte ao mapeamento foram utilizadas as imagens disponíveis no programa *Google Earth*. Para abranger a área total da bacia foram necessárias duas imagens distintas, a primeira recobriu a porção norte da bacia, correspondente ao período de 06/02/2012, e a outra imagem englobou o restante da bacia referente ao período de 09/07/2012. Além das imagens, para compor o banco de dados e auxiliar na geração do mapa de uso da bacia para o ano de 2012, foram utilizados os vetores de uso e de vegetação também referentes ao Mapeamento do Distrito Federal para o ano de 2009.

Depois de organizada a base de dados, foi definida uma chave de classificação que melhor se adequasse aos usos existentes na área de estudo e a proposta necessária ao SWAT. Dessa forma para a área natural foi utilizada a classificação definida por Sano *et al.* (2010) e IBGE (1992), e para as áreas antropizadas foi realizada uma adaptação de IBGE (2006) e Nunes & Roig (submetido).

Como base para o mapeamento foram utilizados os vetores de uso e vegetação (TERRACAP, 2010), que foram unidos originando um arquivo SHP, este foi recortado em seguida para um quadrante abrangendo a área da bacia e mais uma porção de áreas extrapolando o seu limite, esse quadrante foi então sobreposto as ortofotos para a edição e retificação das classes, realizada visual e manualmente.

Após esse procedimento, realizou-se a verificação do mapa com base nas imagens disponíveis no *Google Earth*, para checagem das áreas que permaneciam com os seus usos inalterados, semelhantes às do mapa de 2009, e das áreas que haviam sofrido alterações no decorrer do tempo. As áreas que apresentaram novos usos empregados foram retificadas e vetorizadas novamente de acordo com os limites do novo uso instituído.

Todas as classes presentes no mapa foram revisadas e adaptadas para a nova chave adotada. O passo seguinte foi a correção topológica, para sanar as inconsistências geradas durante a vetorização. Depois de terminada a edição e correção topológica do mapa de uso e cobertura do solo, realizou-se a validação do mesmo em campo.

A validação do mapa em campo ocorreu com auxílio das imagens e de pontos previamente estabelecidos para checagem. Os pontos foram escolhidos aleatoriamente de acordo com as áreas que não puderam ser definidas com propriedade unicamente pela interpretação visual das imagens. Em campo foram coletados pontos com as coordenadas e o tipo de uso que estava presente naquela localização. A confirmação dos usos em campo foi realizada para os pontos que já haviam sido estabelecidos, e também para outras áreas da bacia, que apresentaram diferenças em seus limites, sendo corrigidos manualmente direto no mapa levado á campo, durante o decorrer da visita. Toda a área de estudo foi visitada para a aferição.

Os pontos coletados foram plotados no mapa e em seguida as áreas que apresentavam discrepâncias foram corrigidas, assim como as correções realizadas diretamente no mapa impresso descritas no campo.

### 3.4.5 Reclassificação dos dados de Uso e Ocupação da terra

Para a realização da modelagem as classes estrada não pavimentada, mineração e solo exposto, foram unidas por apresentarem um tipo de uso semelhante, pois não existem informações suficientes dos parâmetros exigidos pelo SWAT, o que inviabilizou a inserção dessas classes separadamente. Além disso esta classe final ocupa uma pequena área da bacia.

Como o modelo SWAT exige um grande número de informações a cerca das classes de uso para poder realizar suas iterações, e não existe a disponibilidade de todos esses dados para a grande maioria das bacias brasileiras, bem como para a bacia em estudo, foi então necessário realizar uma adaptação dos tipos de usos empregados na bacia com as classes presentes no banco de dados do SWAT. Abaixo segue o Quadro 3, com a reclassificação das classes de uso para a modelagem de acordo com os dados tabelados no SWAT.

Quadro 3: Reclassificação dos tipos de uso para a inserção no SWAT.

<b>Classes</b>	<b>Reclassificação</b>
Savana Parque sem Floresta de Galeria	Campo
Savana Arborizada sem Floresta de Galeria	Cerrado
Savana Arborizada com Floresta de Galeria	Mata de Galeria
Grão Irrigado	Milho
Grão Sequeiro	Soja
Horticultura	Agricultura Intensiva de pequeno porte
Fruticultura	Laranja
Cana/Capim Forrageiro	cana-de-açúcar
Gramma	Gramma
Pastagem	Pastagem
Eucalipto	Eucalipto
Fábrica	Industrial
Chácara	Urbanização de baixa densidade
Loteamento	Urbanização de média baixa densidade
Solo Exposto	Estrada não pavimentada
Estrada Pavimentada	Transporte
Corpos D'água	Água

As classes campo, cerrado, mata de galeria e eucalipto foram criadas utilizando como base as características de outros usos presentes na base de dados do SWAT e tiveram apenas o valor do parâmetro CN2 alterado, além dos usos de vegetação nativa, alterou-se o CN2 para

outras classes de uso (Tabela 5) . Para a classe solo exposto foi criada uma classe empírica, denominada Estrada não Pavimentada, já que na base de dados não há nenhum uso que se assemelhe com este, sendo que o que mais se aproxima é a classe transporte, uma vez que não pode haver duas classes iguais, foi criada uma classe denominada Estrada não Pavimentada com os valores dos parâmetros similares aos da classe transportes modificados baseado apenas na expertise prática. Os outros tipos de usos foram somente reclassificados de acordo com a tabela do modelo, não tendo nenhum valor alterado.

Os valores de CN2 foram alterados de acordo com dados referente as condições brasileiras sempre que possível, baseado na premissa de que mesmo sendo de regiões diferentes esses dados se adequaram melhor a realidade da bacia em análise do que os dados disponíveis na base do SWAT, que pertencem a realidade de bacias dos Estados Unidos. Os valores de CN, que foram alterados no modelo, foram adaptados dos trabalhos de Setzer e Porto (1979), Sartori (2004) e Lima (2009) (Tabela 5).

Tabela 5: Valores de CN adaptados de Setzer e Porto (1979), Sartori (2004) e Lima (2009).

<b>Classe de Uso</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Campo	49	69	79	84
Cerrado	39	61	74	80
Mata de Galeria	20	40	49	52
Eucalipto	45	66	77	83
Pastagem	49	69	79	84
Gramma	59	67	74	81
Estrada Pavimentada	72	82	87	89
Estrada não Pavimentada	59	74	82	86
Urbanização de baixa densidade	64	75	83	87
Urbanização de média baixa densidade	68	79	86	89

#### 3.4.6 Estações Climatológicas

Os dados climáticos necessários são dados diários de precipitação, temperaturas máximas e mínimas do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Os valores para esses parâmetros podem ser lidos a partir de registros de dados observados ou podem ser gerados pelo modelo (Neitsch *et al.*, 2005a; Neves, 2005; e Neves *et al.*, 2006).

Para suprir as informações de dados climáticos que o modelo necessita foram obtidos dados da estação climática da Embrapa Cerrados e de estações pluviográficas instaladas na bacia (Figura 13).

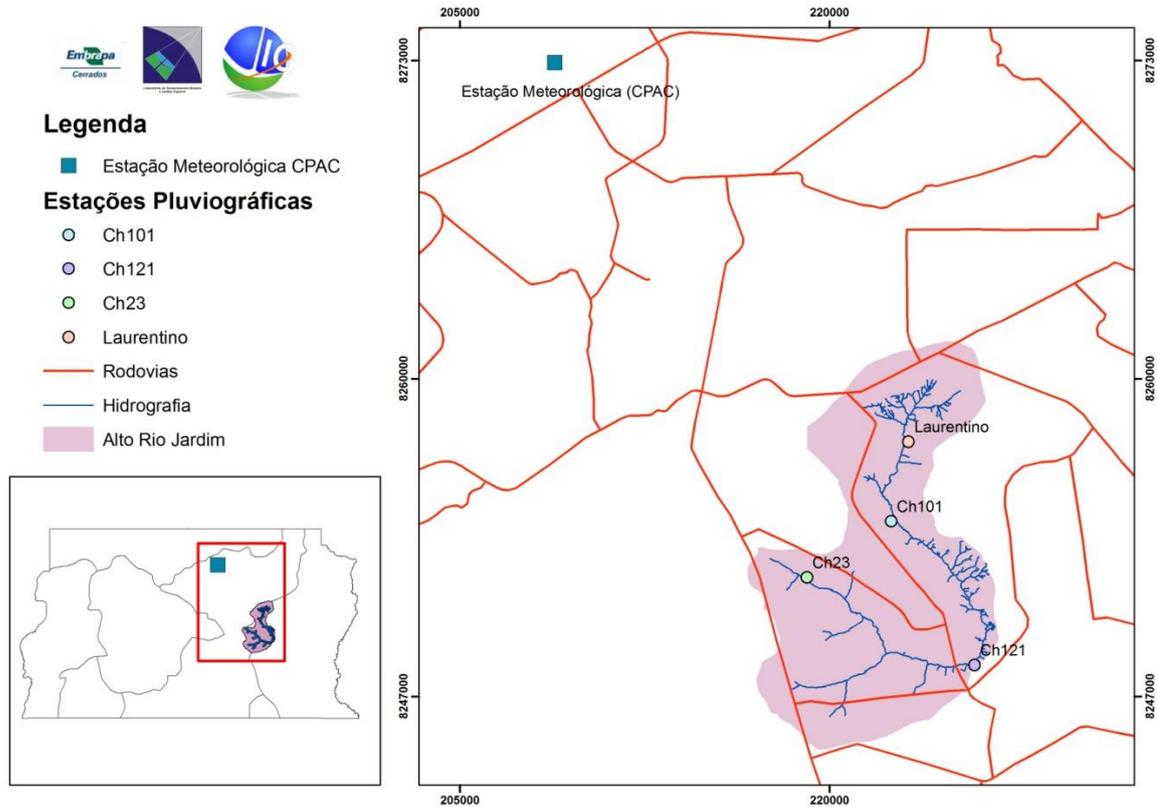


Figura 13: Localização das estações climatológicas da Embrapa Cerrados e das estações pluviométricas localizadas na bacia do alto rio Jardim.

A bacia experimental do alto rio Jardim possui uma infraestrutura direcionada ao monitoramento hidrológico constituída por quatro estações pluviográficas automáticas, cinco estações fluviográficas automáticas, nove tubos de acesso para o monitoramento do nível do lençol freático em cinquenta e seis poços piezométricos (Lima, 2010).

As estações pluviográficas instaladas na bacia possuem pluviógrafos de balança automáticos conectados à *dataloggers* que gravam a precipitação a cada 0,25 mm. O monitoramento das vazões nas estações fluviográficas da bacia foram realizados com limnígrafos automáticos com armazenadores de dados, molinete hidrográfico e *AVD Flowtracker* para determinação da curva chave da vazão, o intervalo de tempo de obtenção dos dados foi de 10 minutos (Lima, 2010).

A estação meteorológica da Embrapa Cerrados (CPAC) é constituída por pluviógrafo com precisão de 0,25mm de lâmina precipitada, com registro total da chuva a cada 10

minutos. A radiação é medida no comprimento de ondas do eletromagnético no intervalo de 310nm a 2800nm, com erro de precisão de 1% até 400 W m<sup>-2</sup>. Os sensores de temperatura e umidade são mantidos em abrigo termométrico, sendo que o erro de precisão dos sensores térmicos é de 0,3 °C, e do sensor de umidade de até 2% quando a umidade é inferior a 90% e de 3% quando a umidade for superior a 90%. O Tanque Classe A está instalado no centro da estação, e possui um sensor que registra a altura da lâmina precipitada diariamente e permite o calculo da lâmina evaporada por diferença (Muller *et al.*, 2007).

### 3.4.7 Dados Climáticos

A série histórica de dados climáticos utilizada para realizar a simulação hidrológica na bacia do alto rio Jardim abrange o período de 01/07/2006 a 30/06/2008, sendo os dados de precipitação extraídos das estações pluviográficas instaladas na bacia e as demais informações da estação meteorológica da Embrapa Cerrados distante da bacia cerca de 30 km.

Os dados de precipitação pertencem a quatro estações distintas distribuídas dentro da bacia, como esta começou a ser monitorada recentemente não possui uma serie histórica de precipitação muito longa, os anos utilizados para esse trabalho vão de 2006 a 2008. O SWAT geralmente necessita de uma série extensa de dados, o ideal é realizar a simulação com uma série que possua vinte anos de dados medidos. Como não existe uma estação com uma série de dados tão consistente na bacia, foi utilizado o período de 01/07/2006 a 30/06/2007 para a calibração e para a validação o período de 01/07/2007 a 30/06/2008 (Figura 14).

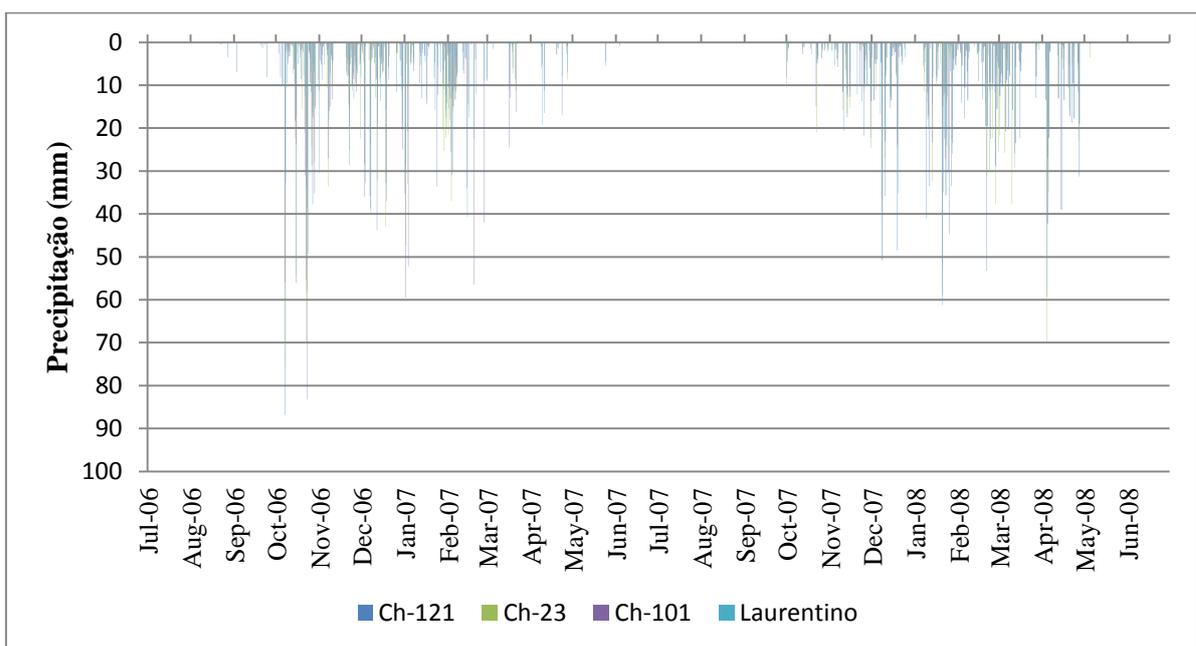


Figura 14: Série pluviométrica da Bacia do Alto Rio Jardim (Lima, 2010).

Apesar das simulações com modelos hidrológicos requererem muitos anos de dados, geralmente não há a disponibilidade dessas informações para períodos tão extensos quando se estuda pequenas e médias bacias. O período utilizado para a simulação compreende o intervalo de dois anos, onde a análise se inicia no período de seca e abrange o período das chuvas, para os dois anos hidrológicos. Tucci (1998) coloca que a representatividade da série depende dos objetivos que se almejam alcançar, e se configura num importante fator para que a estimativa dos parâmetros seja confiável para a faixa de valores disponíveis, uma vez que a extrapolação pode levar a valores tendenciosos.

É necessário para execução do modelo SWAT considerar um período de aquecimento (warm up), um para a calibração e outro para a validação. Na literatura é possível encontrar outros trabalhos que utilizaram séries de dados curtas. Blainski & Garbossa (2009), Bonumá *et al.* (2010), e Lelis & Calijuri (2010) utilizaram séries temporais de três anos para simulações com o modelo SWAT. Griesven *et al.* (2006) utilizaram um período de dois anos de dados para as bacias do Rio Sandusky, 1998-1999, e do Alto Rio Bosque Norte, 1995-1996, para a avaliação da análise de sensibilidade. Machado (2002) aplicou o modelo SWAT, para o biênio 1999-2000, para a simulação do escoamento superficial e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Marins, em São Paulo. E Lopes & Kobayama (2008) também realizaram simulação com o modelo SWAT para analisar o equilíbrio hidrossedimentológico e as características geomorfológicas em uma microbacia experimental em Santa Catarina, para um período de dois anos de dados.

As séries de dados de radiação solar, umidade relativa do ar temperatura e velocidade do vento pertencem a estação climatológica da Embrapa Cerrados e correspondem ao período de 01/07/2006 a 30/06/2008. Abaixo seguem os gráficos (Figura 15) com o comportamento desses parâmetros para o respectivo período.

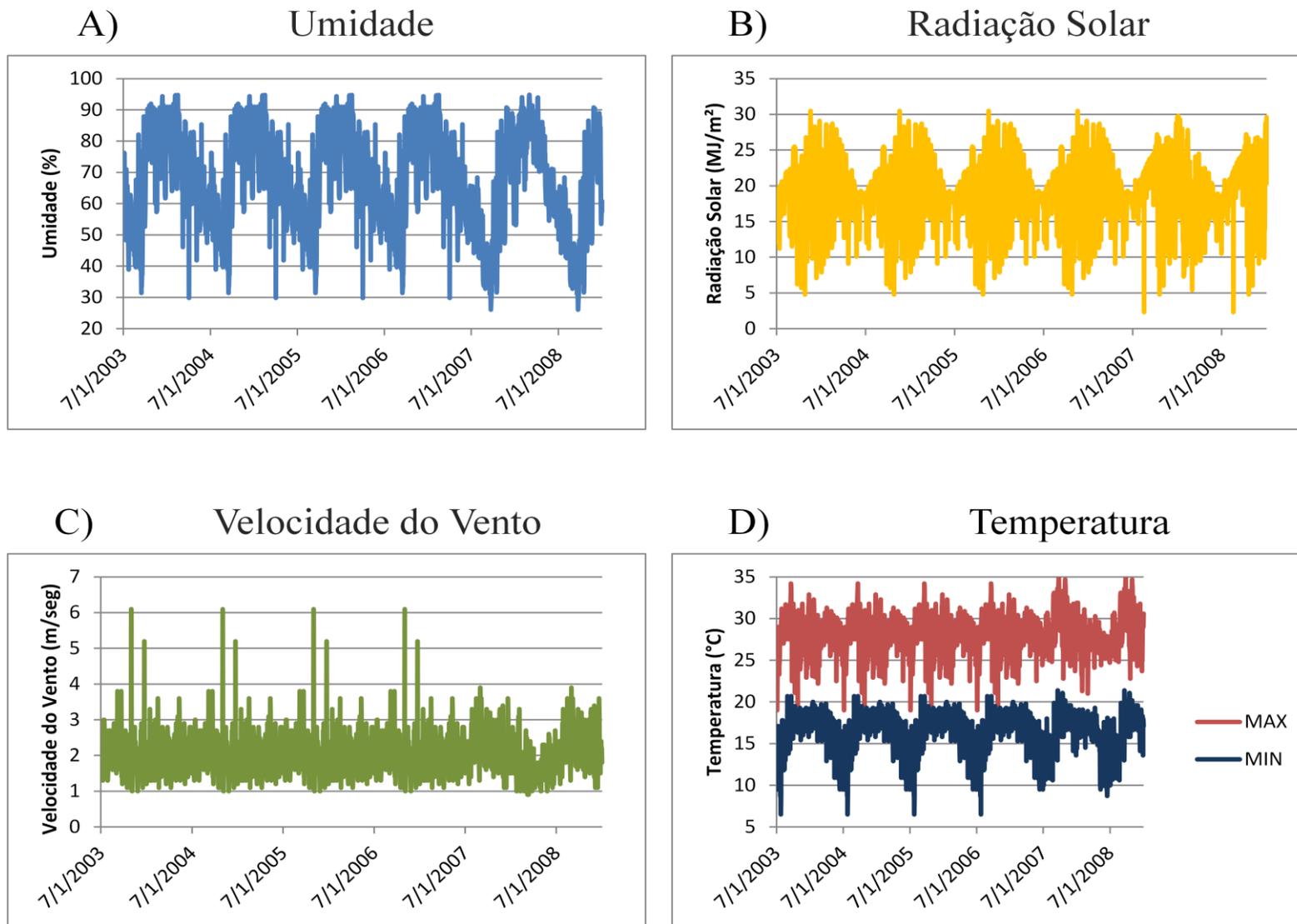


Figura 15: Gráficos das séries históricas climatológicas. A) Umidade; B) Radiação Solar; C) Velocidade do Vento D) Temperatura.

### 3.4.8 Dados de Vazão

Os dados fluviométricos são utilizados para o ajuste e verificação dos parâmetros dos modelos, portanto se houver tendenciosidade ou inconsistência nestas informações as mesmas são transferidas para o ajuste e para o prognóstico (Tucci, 1998).

O monitoramento da vazão foi efetuado em cinco estações distribuídas na bacia (Figura 16). Foram feitas medições em diferentes níveis da água utilizando molinete hidrométrico e *AVD Flowtracker* e em cada estação foram instaladas réguas limnimétricas, o intervalo de tempo de medição nas estações foi de 10 minutos (Lima, 2010).

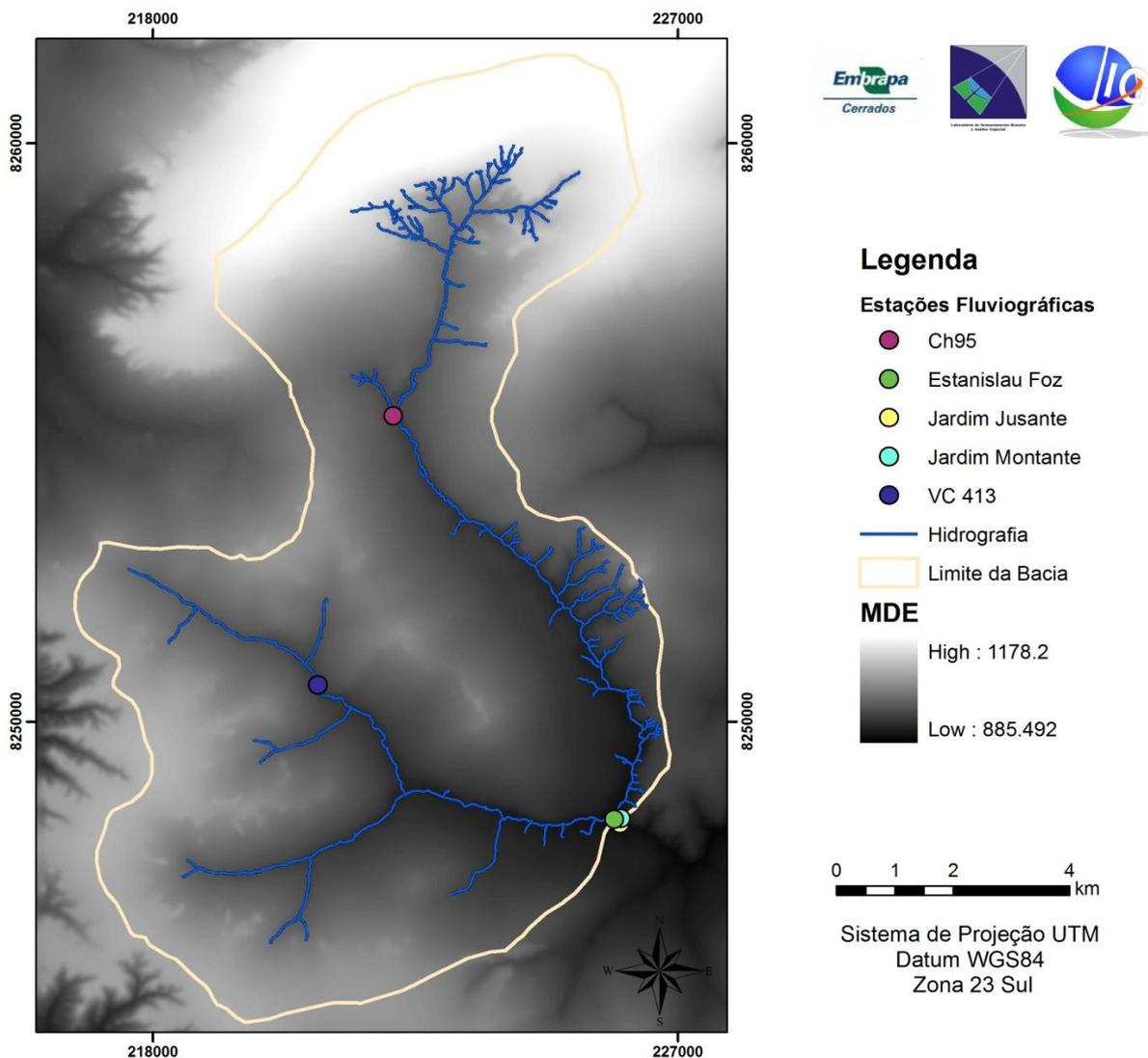


Figura 16: Localização das estações fluviográficas da Bacia do Alto Rio Jardim (Lima, 2010).

Os dados de vazão compreendem o período de 01/07/2006 a 30/06/2008 (Figura 17), para as cinco estações ao longo da bacia. Os valores medidos da vazão não são dados de

entrada para o modelo, esses compõem a base de dados pois serão utilizados nas fases de calibração e validação dos resultados.

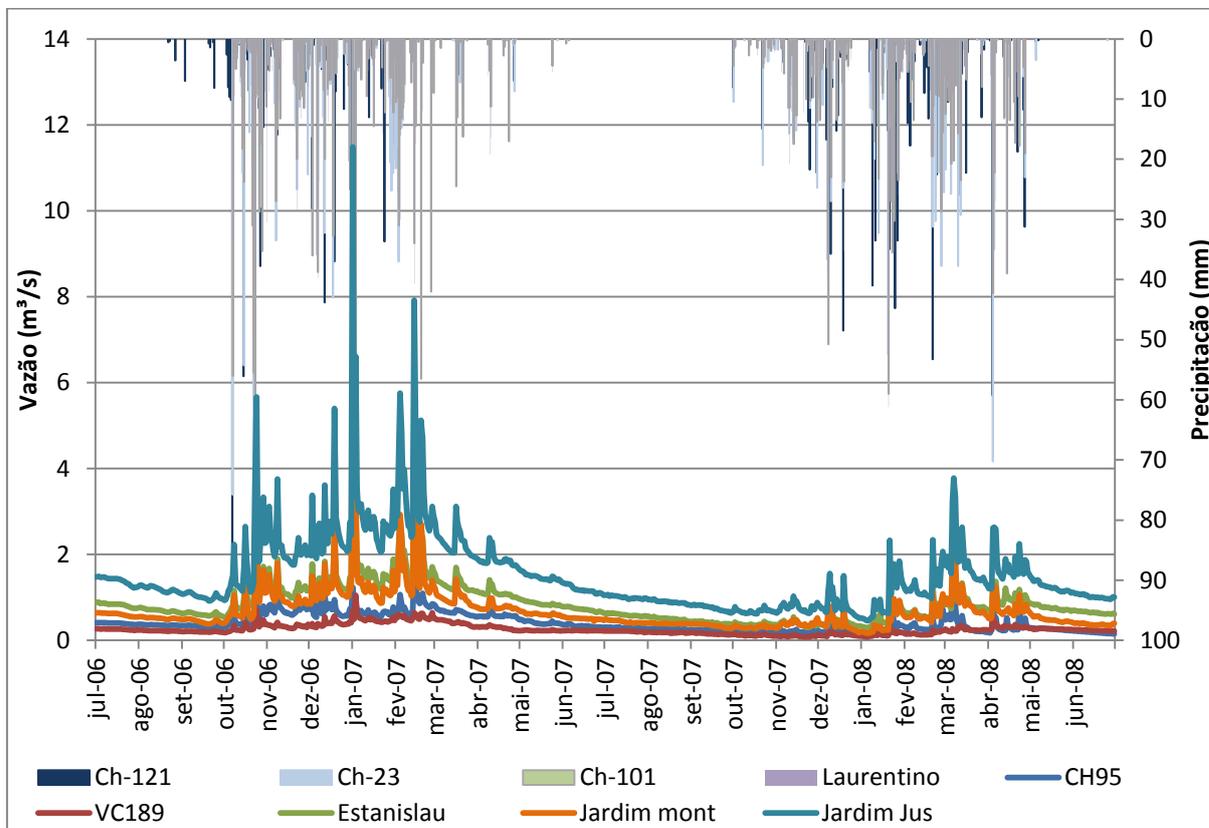


Figura 17: Séries de vazão da Bacia do Alto Rio Jardim (Lima, 2010).

### 3.5 Etapas de Execução

Os planos de informação e os dados alfanuméricos necessários para entrada no modelo são inseridos a partir de uma interface entre o SWAT e o ArcGis® (Di Luzio *et al.*, 2001). A ferramenta de interface, ArcSWAT, está disponível para download no site do SWAT, *homepage* <http://swatmodel.tamu.edu/software/arcsbat>.

As etapas para execução do modelo são apresentadas no fluxograma abaixo (Figura 18).

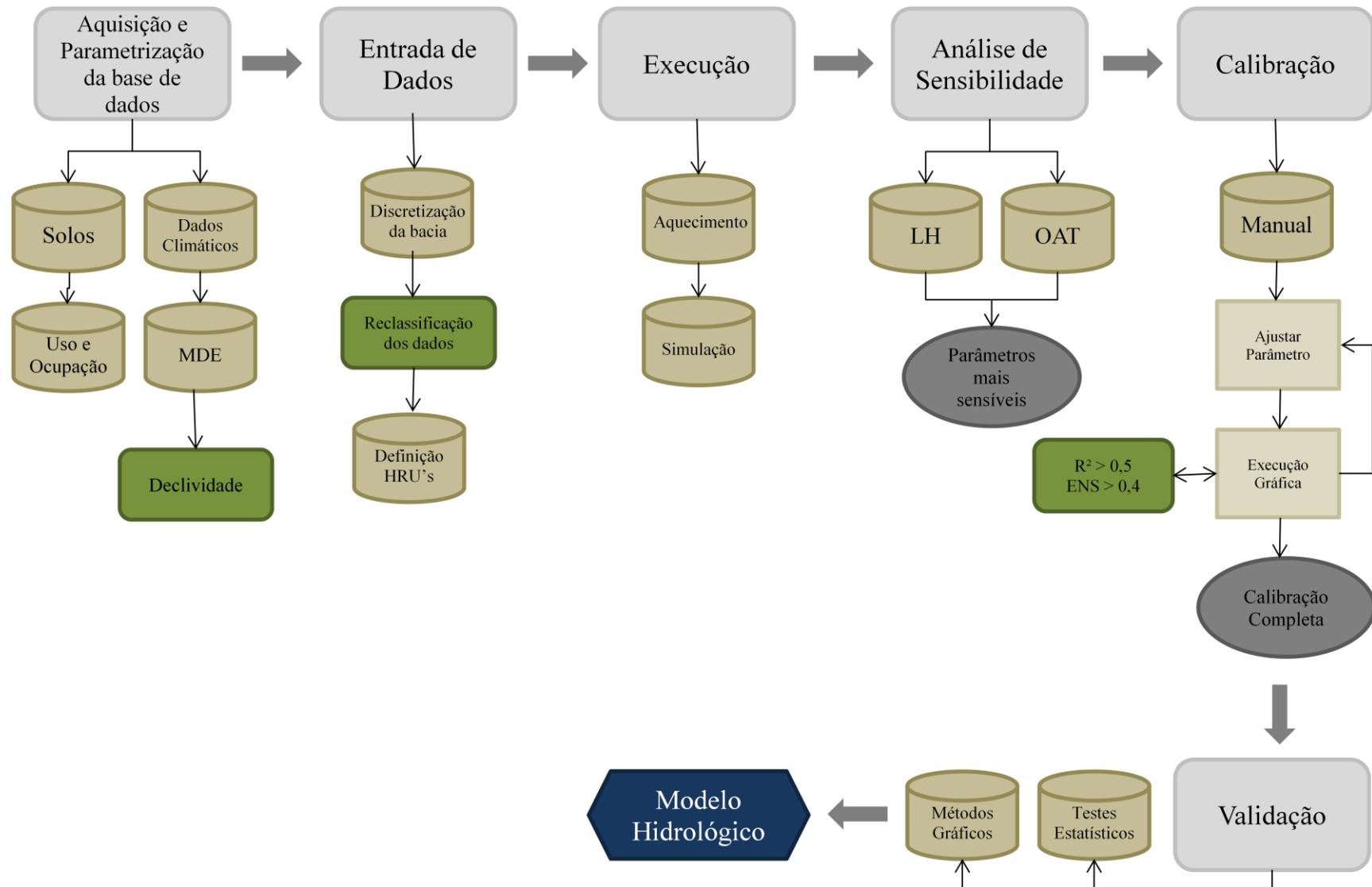


Figura 18: Fluxograma Metodológico. MDE - Modelo Digital de Elevação; HRU – Unidade de Resposta Hidrológica; LH - Hipercubo Latino; OAT - One Factor at a Time.

O conjunto de dados espaciais e arquivos de banco de dados necessários precisam estar preparados antes de executar a interface (Winchell *et al.*, 2010). Inicialmente é indispensável saber quais dados serão necessários para a aplicação do modelo e organizar uma base com os dados que serão utilizados. As informações são inseridas no SWAT por meio de tabelas contendo as características físicas referentes à bacia e os dados espaciais por intermédio da interface.

Os dados de entrada espaciais para realizar as simulações do modelo são MDE (Modelo Digital de Elevação), mapa de uso e cobertura do solo e o mapa de solos. Além dos dados espaciais requeridos, as informações a respeito das propriedades dos solos e das características do uso da terra, assim como a localização das estações e os dados climáticos diários também são tabulados para suprir o modelo.

### 3.5.1 Discretização da Bacia

O modelo digital de elevação (MDE) fornece os valores de altimetria para a área, e servirá de base para a discretização da bacia em sub-bacias, para a definição da área de drenagem automaticamente e para a geração do mapa de declividade da bacia. Para o delineamento do limite da bacia e das sub-bacias o SWAT utiliza ferramentas disponíveis no *Spatial Analyst* do ARCGIS, onde são calculados, considerando a altitude, a direção do fluxo de drenagem, o fluxo de drenagem acumulado, a definição dos limites da bacia hidrográfica, a rede de drenagem, e respectivas sub-bacias com seus exutórios (Di Luzio *et al.*, 2001, Sales 2012).

A direção de fluxo e fluxo acumulado são gerados através de uma grade regular, tomando-se por base a linha de maior altitude do terreno. A nova grade numérica gerada determina a direção de maior altitude de um pixel em relação a seus oito pixels vizinhos. Assim, ocorre a descrição numérica da direção que a água irá percorrer após atingir cada pixel, que pode ser representada graficamente por meio da aplicação do código de direção (Alves Sobrinho *et al.*, 2010).

A delimitação da área da bacia assim como das sub-bacias foi realizada utilizando somente o MDE, para a definição das sub-bacias o modelo dispõe de duas alternativas, a primeira através de uma área limite definida pelo usuário e a outra a partir da inserção da rede de drenagem, que dependendo da escala traz um maior detalhamento e por conseguinte gera um número maior de sub-bacias, dessa forma foi utilizada a primeira opção que possibilita um certo controle do número de sub-bacias que serão geradas. Foi então definida uma área limite

de 500 hectares, esta área foi adotada depois de testes de tentativa e erro, foi a área que se aproximou melhor do número de sub-bacias com o exutório compatível com a localização das estações fluviográficas.

Depois dessa etapa foi definido o ponto de seção de saída da bacia, então foi gerado o contorno da bacia do alto rio Jardim e as suas sub-bacias, em seguida foram calculados os parâmetros geomórficos de cada sub-bacia e dos rios bem como a definição de reservatórios presentes em cada uma, se definido anteriormente, no caso dessa bacia não foi definido nenhum reservatório.

### 3.5.2 Definição das HRU's

A área de uma sub-bacia pode ser dividida em unidades de resposta hidrológica (HRUs). Estas unidades são partes de uma sub-bacia que possuem tipo de solo, declividade e uso e cobertura da terra exclusivos. As cargas transportadas pelo escoamento são calculadas separadamente para cada HRU e depois somadas para determinar as cargas totais da sub-bacia. Se a interação de uma área de uso do solo com outro é importante, a definição das HRUs não é recomendada, devendo ser substituída pela opção de sub-bacias (Neitsch *et al.*, 2002).

O mapa de solos e de uso e cobertura juntamente com o mapa de declividade, gerado com base no MDE, fornecerão as características fundamentais para que o modelo delimite as HRU's (Winchell *et al.*, 2010). Antes de entrar com os mapas no modelo é importante inserir os dados exigidos com as características dos solos e de uso da terra, na base de dados do SWAT, pois a partir destas informações o modelo irá reclassificar os mapas de acordo com os dados tabelados.

Em seguida o SWAT gera o mapa de declividade de forma automática, calculado através da análise da taxa máxima de mudança entre um pixel e seus vizinhos. Deve então ser definido o número de classes de declividade e o valor de intervalo de cada classe. Para a bacia foram adotadas três classes de declividade, definidas anteriormente de acordo com as limitações do MDE, as classes variaram de 0% a 7%, de 7% a 14% e de 14% até o valor limite (999%), foram adotadas apenas três classes devido as limitações do MDE, como dito anteriormente, devido a bacia ser predominantemente de relevo suave-ondulado e pelo fato da última classe ter gerado áreas pequenas, portanto se o número de classes adotado fosse superior seriam geradas classes com áreas muito pequenas. Depois da reclassificação de todos

os dados de entrada é realizada a sobreposição destes planos de informação, para traçar as áreas das HRU's.

A definição das HRU'S é realizada após a sobreposição dos dados espaciais, neste passo são determinados critérios para a definição das unidades de reposta hidrológica, onde podem ser criadas uma ou mais combinações entre solos, uso e declividade. O SWAT possui três opções para a geração das HRU's, a primeira leva em consideração a combinação entre os tipos de solos, usos e declividades dominantes, a segunda utiliza a HRU dominante e a terceira opção considera múltiplas HRU's (Winchell *et al.*, 2010).

Para esse trabalho optou-se pela terceira opção, porém sem eliminar nenhuma combinação possível em nenhum dos níveis de sensibilidade. Assim para a criação das HRU's foram mantidos todos os tipos de solo, uso e declividade.

### 3.5.3 Entrada de Dados Climático

A etapa subsequente foi a inserção das tabelas com os dados de precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade, radiação solar e velocidade do vento. Para esse trabalho não foi necessário a criação da base de dados para o gerador climático pois as séries de dados não continham falhas.

A distribuição dos dados pluviométricos foi realizada de forma automática pelo SWAT, o modelo considera a série de precipitação por sub-bacia, dessa forma ele agrega os valores de determinada estação a sub-bacia mais próxima, essa relação é estabelecida em relação a localização da estação pluviográfica e o centróide de cada sub-bacia (Figura 19).

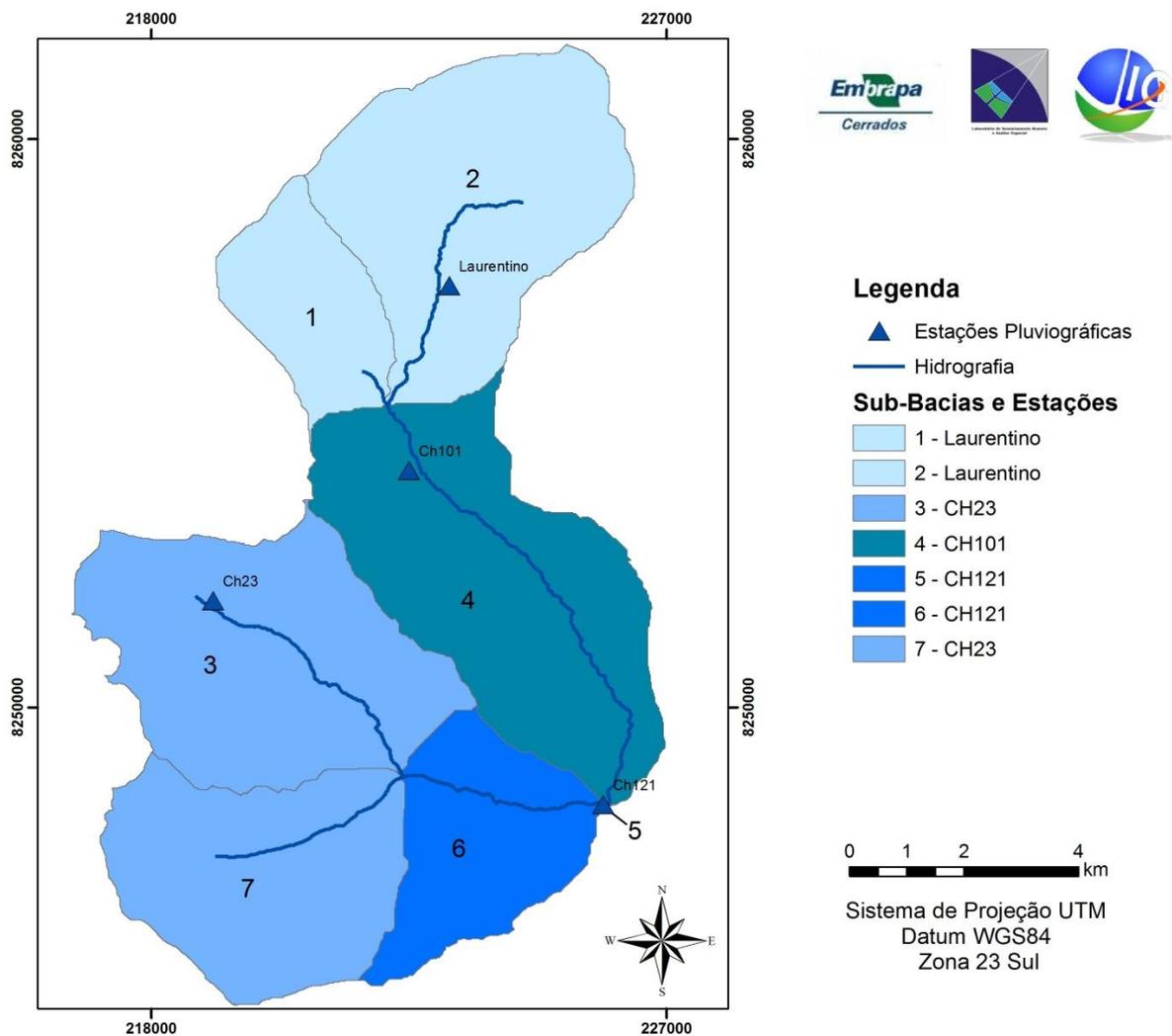


Figura 19: Distribuição espacial das estações pluviográficas por sub-bacia.

A distribuição espacial da chuva no Distrito federal apresenta uma alta sazonalidade. A variabilidade espacial do padrão da precipitação é um importante fator que afeta a precisão das previsões de vazão, em regiões sem redes pluviométricas densas, a falta de dados distribuídos de precipitação poderá ser um fator limitante para o desempenho do modelo (Hernandez *et al.*, 2000; Zhao *et al.*, 2011). Assim foram utilizadas quatro estações pluviográficas, instaladas dentro da bacia.

Na Figura 20 apresenta-se a distribuição anual da chuva para as quatro estações, para o período de julho de 2006 a junho de 2008 e a vazão observada no exutório da bacia.

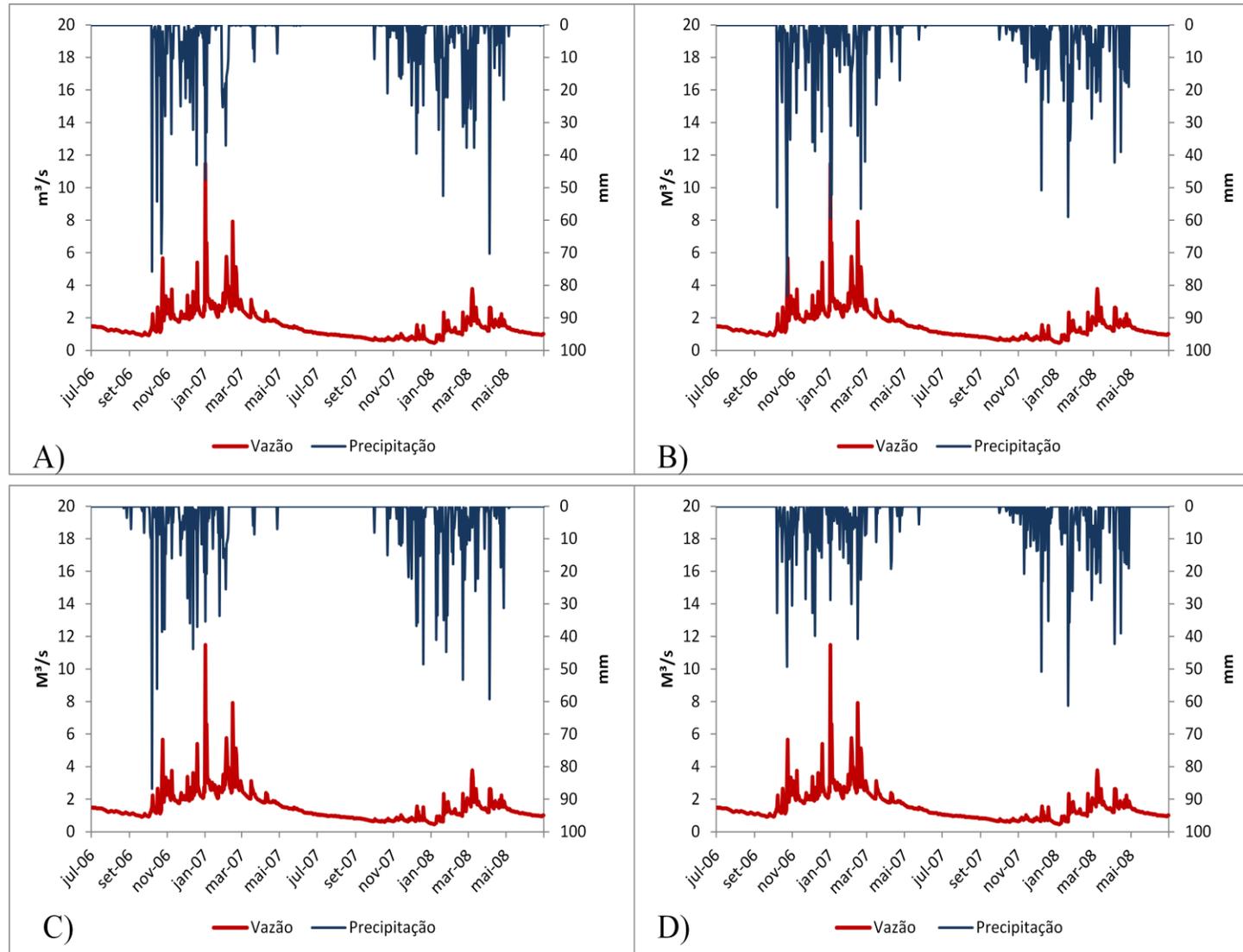


Figura 20: Distribuição anual da chuva na bacia do Alto Rio Jardim (Lima, 2010). A) Estação CH23; B) Estação CH101; C) Estação CH121; D) Estação Laurentino

Analisando a figura apresentada é possível perceber a variação espacial da chuva na bacia, para o período. Essa assertiva se torna evidente quando observados os dados de precipitação dos quatro gráficos, em uma breve comparação, é perceptível que para as estações CH23 e CH121, não foram registrados dados de chuva entre o período de fevereiro a março de 2007, e para as outras duas estações houve um volume considerável de precipitação (atingindo 56 mm para a estação CH101), que foi devidamente refletido na resposta dos picos para a vazão.

É possível perceber também que a estação Laurentino apresenta um volume inferior de precipitação se comparada as outras estações para o ano 2006/2007, onde para as outras estações existem registros máximos de aproximadamente 80 a 90 mm para a estação Laurentino a precipitação máxima registrada não é superior à 50 mm. Assim, fica claro que o uso de apenas uma das estações poderia causar erros nos dados de saída e comprometer os resultados da modelagem.

#### 3.5.4 Período de Aquecimento

Carvalho Neto (2011) realizou um teste utilizando o modelo SWAT submetendo um mesmo ano de eventos de precipitação repetido sete vezes, dessa forma constatou que o modelo comporta-se de forma bastante discrepante no primeiro ano de simulação, para geração do escoamento superficial e produção de sedimentos, o segundo ano apresenta resultados intermediários enquanto que os demais anos possuem seus resultados oscilando em um intervalo bem definido. Dessa maneira, em seu trabalho ele utilizou a duplicação dos três primeiros anos de dados para o aquecimento do modelo. Assim como Carvalho Neto (2011), Oliveira *et al.* (2006) também utilizaram a duplicação dos dados e os três primeiros anos para o período de aquecimento do modelo.

Lima (2010) observou que para a bacia do alto rio Jardim, o modelo FEFLOW apresentou problemas para representar as condições iniciais do modelo, para contornar tais dificuldades foi utilizado um período de dois anos para o aquecimento, compondo uma série com três anos de dados, sendo os dois primeiros réplicas do ano hidrológico utilizado para a simulação.

O período de dados utilizado se inicia em 01/07/2006 e se prolonga até 30/06/2008. Para que fosse possível utilizar parte da série para o período de aquecimento do modelo, o ano hidrológico correspondente à 01/07/2006 a 30/06/2007 foi então replicado três vezes, e

utilizados para satisfazer as condições iniciais para a simulação. Sendo usados para comparação com os dados observados apenas o período 01/07/2006 a 30/06/2008.

### 3.5.5 Simulação

Com todos os dados devidamente inseridos no modelo, após a finalização de todas as configurações de entrada a próxima etapa do processo é definir e executar o modelo, onde serão executadas as equações para a simulação dos diversos processos. A simulação para a bacia foi elaborada com uma série histórica de dois anos ( 01/07/2006 a 30/06/2008), tendo sido usado um período de aquecimento de três anos anteriores, originando uma série de seis anos, ressaltando que os três primeiros anos foram desprezados, assim a série utilizada se refere ao período de 01/07/2003 a 30/06/2008.

### 3.5.6 Análise de Sensibilidade

Posteriormente a simulação do modelo é realizada a análise de sensibilidade, a qual define os parâmetros que apresentam maior sensibilidade para as simulações aplicadas pelo modelo.

A análise de sensibilidade pode ser conduzida com uso dos dados observados ou utilizando como base os valores simulados pelo SWAT. O SWAT utiliza o método LH-OAT para identificar os parâmetros mais significativos na modelagem. Foram utilizados os dados da vazão observada na bacia, referentes ao mesmo período proposto para a calibração (01/07/2006 a 30/06/2007).

É necessário definir quais serão os limites utilizados para que os dados variem, dessa forma os limites usados para definir quais dados mais sensíveis para o modelo foram definidos considerando a variação de alguns parâmetros em campo, referências de outros trabalhos e conhecimento empírico.

Existem três métodos no SWAT para definir a alteração dos parâmetros dentro dos limites estabelecidos, **a substituição direta**, onde o modelo altera o valor diretamente, **por adição**, em que um valor constante é adicionado no valor inicial do parâmetro e **por multiplicação**, onde a alteração dos valores é estabelecida variando o valor inicial por porcentagem. Foram utilizados vinte e um parâmetros que são significativos para a simulação do fluxo de água.

A relação de parâmetros utilizados, os limites máximos e mínimos definidos para a análise de sensibilidade bem como o método utilizado para cada parâmetro, são apresentados na tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros e limites utilizados para a análise de sensibilidade.

<b>Parâmetros</b>	<b>Sigla</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>Limite Superior</b>	<b>Método</b>
Constante de recessão do escoamento de base (dias)	Alpha BF	0.0	0.3	Substituição
Eficiência do revolvimento biológico (mm)	Biomix	0	1	Substituição
Índice do potencial máximo de área foliar	Blai	0.5	10	Substituição
Armazenamento máximo do dossel (mm H <sub>2</sub> O)	Canmx	0	20	Substituição
Curva Número para a condição II	CN2	-20	10	Multiplicação
Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm h <sup>-1</sup> )	Ch_K	0.025	76.0	Substituição
Coefficiente de rugosidade de Manning	Ch_N	0.0025	0.065	Substituição
Fator de compensação de água pelas plantas	Epc	0	1	Substituição
Fator de compensação de evaporação do solo	Esco	0.01	1.0	Substituição
Tempo de retardo da água subterrânea	GWDelay	-5	30	Adição
Coefficiente "revap" de água subterrânea	GWRevap	0.02	0.1	Substituição
Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície (mm H <sub>2</sub> O)	GWqmn	-1000.0	1000.0	Adição
Fração de água percolada para o aquífero profundo	Rchrg_Dp	0.0	0.5	Adição
Profundidade em aquífero profundo para que haja "revap"	Revapmn	0	500	Substituição
Declividade média (m m <sup>-1</sup> )	Slope	-25	25	Multiplicação
Comprimento da declividade média (m)	Slsbbsn	-25	25	Multiplicação
Albedo do solo úmido	Sol_Alb	-25	25	Multiplicação
Capacidade de água disponível no solo (mm h <sup>-1</sup> )	Sol_Awc	-68	100	Multiplicação
Condutividade hidráulica saturada dos solo	Sol_K	-97	2000	Multiplicação

(mm h <sup>-1</sup> )				
Profundidade da camada de solo (mm)	Sol_Z	-25	25	Multiplicação
Coeficiente de retardo do escoamento superficial (dias)	Surlag	0.0	0.5	Substituição

Os valores negativos presentes na tabela para o método da multiplicação significam que o parâmetro pode variar x por cento a menos do valor inicial. Para o parâmetro GWQMN os limites estabelecidos indicam que o limite entre a profundidade de água no aquífero raso e a superfície pode oscilar em 1000 mm a mais ou a menos do valor atual.

Depois de definidos os valores limites para cada parâmetro, o usuário pode especificar de acordo com o parâmetro, em que tipo de uso, solos, declividade, HRU e sub-bacias este parâmetro pode variar. Foi estabelecido nessa sessão que os parâmetros escolhidos deveriam variar em todos os tipos anteriormente descritos.

Foram efetuadas 1050 simulações do modelo, com intervalos de 50 para o *Latin hypercube*, sendo alterado em 5% o valor de cada parâmetro, em cada ponto dentro de cada intervalo *Latin hypercube* sorteado, um por vez, de acordo com o método OAT. A análise de sensibilidade foi efetuada comparando os resultados com os valores médios simulados e como foram utilizados os dados observados definiu-se também as função objetivo soma dos quadrados dos resíduos (SSQ) e soma dos quadrados dos resíduos ranqueada (SSQR) para apontar quais parâmetros apresentavam maior sensibilidade ao modelo.

### 3.5.7 Calibração e Validação

Em seguida foi feita a calibração do modelo. O período destinado para a calibração da modelagem foi de um ano hidrológico referente a 01/07/2006 a 30/06/2007, utilizando os dados de vazão referentes a estação Jardim Jusante, localizada no ponto exutório da bacia. O processo de calibração se deu de forma manual, utilizando dados diários, onde cada parâmetro foi sendo alterado até resultar em uma resposta satisfatória da vazão simulada em relação a vazão observada.

Para avaliar a eficiência das simulações foram utilizados o índice de Nash e Sutcliffe (ENS) e o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) (Eq. 7 e 8). Os demais testes estatísticos como razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão das observações (RSR), percentual de tendência (PBIAS) e o índice de Nash e Sutcliffe alterado que considera a vazão média mensal inter-anual (COEA), não foram utilizados pois não há um valor de referência que aponte um valor satisfatório para a calibração com dados diários.

$$ENS = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=l}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=l}^n (y_i^{obs} - y^{med,obs})^2} \right] \quad \text{Eq.7}$$

$$R^2 = \left[ \frac{(\sum_{i=l}^n (y_i^{obs} - y^{med,obs})(y_i^{sim} - y^{med,sim}))^2}{\sum_{i=l}^n (y_i^{obs} - y^{med,obs})^2 \sum_{i=l}^n (y_i^{sim} - y^{med,sim})^2} \right] \quad \text{Eq.8}$$

Onde:

$y_i^{obs}$  é a vazão observada;

$y_i^{sim}$  é a vazão simulada;

$y^{med,obs}$  é a média da vazão observada e;

$y^{med,sim}$  é a média da vazão simulada.

Para a validação do modelo foi utilizado o período de 01/07/2007 a 30/06/2008, usando os mesmos valores, obtidos na calibração, para os parâmetros, e em seguida foram aplicados os testes de eficiência para avaliar se os parâmetros alterados na calibração foram capazes de representar a vazão de forma satisfatória também para o período de validação.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo traz os resultados obtidos na modelagem, bem como uma análise dos mesmos, comparando com outros estudos com o mesmo modelo e com demais trabalhos hidrológicos na área de estudo.

### 4.1 Modelo Digital de Elevação

O modelo digital de elevação gerado (Figura 21), representa a altimetria para a área da bacia e arredores, onde a altitude mínima encontrada foi de 885,5 metros e a altitude máxima chega a 1178,2 metros.

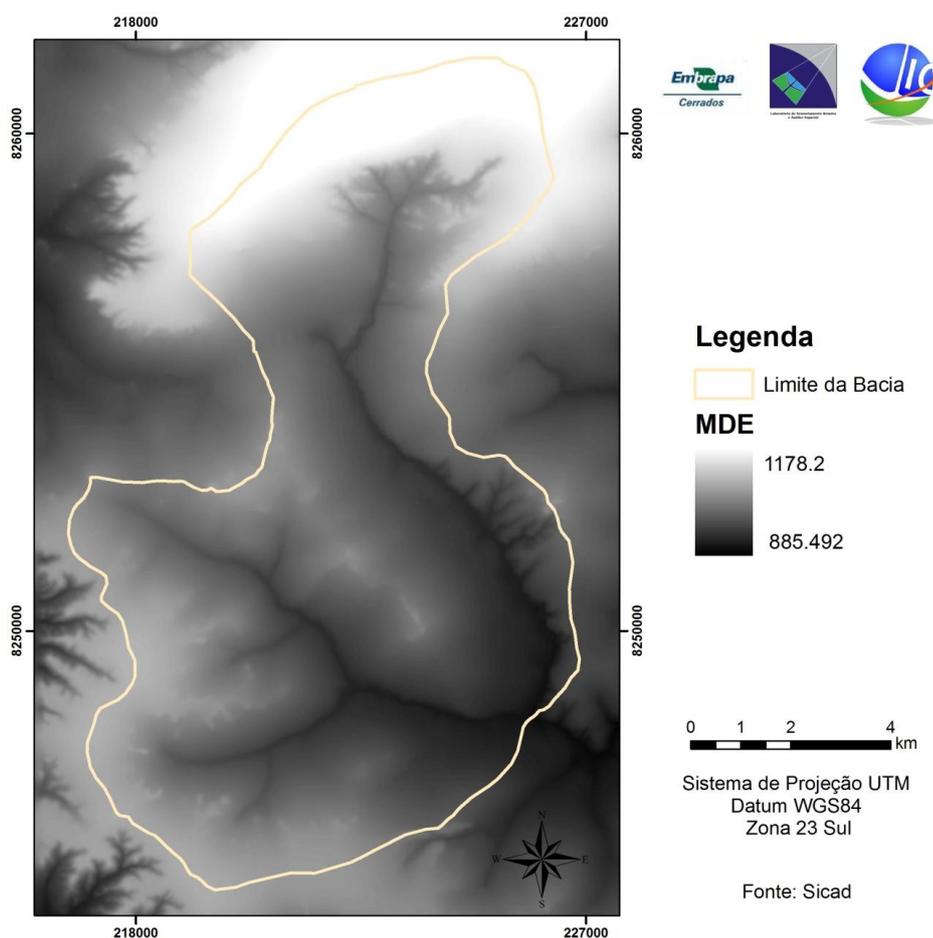


Figura 21: Modelo Digital de Elevação gerado para a bacia do Alto Rio Jardim.

### 4.2 Mapa de Uso

O mapeamento na bacia resultou em dezenove classes de uso definidas de acordo com as características de ocupação da bacia e de acordo com a compatibilidade desses usos para a modelagem (Figura 22).

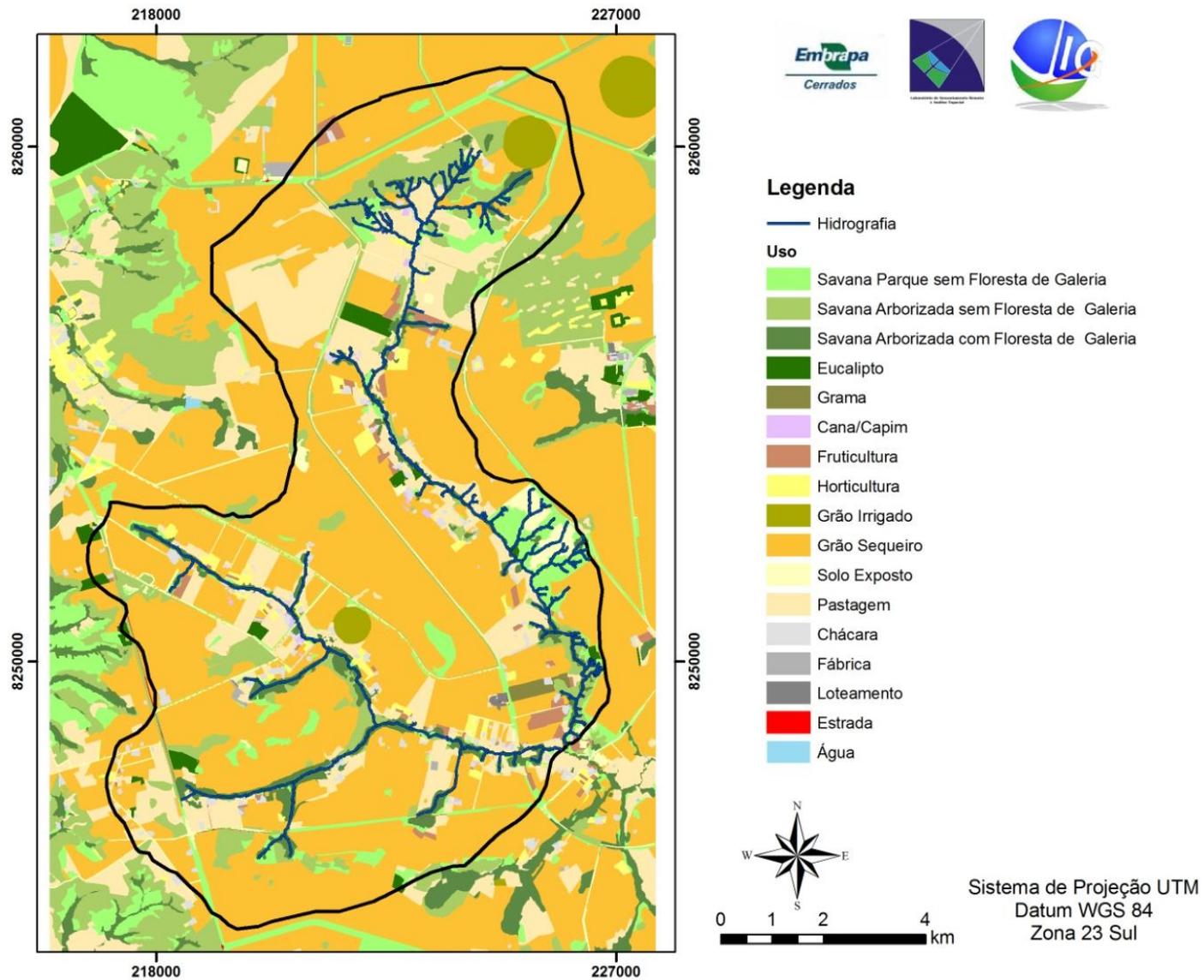


Figura 22: Mapa de uso da Bacia do Alto Rio Jardim

**Savana Parque Sem Floresta de Galeria:** Subgrupo constituído por um extrato graminóide, integrado por hemicriptófitos e geófitos de florística natural ou antrópica, entremeado por nanerófitos isolados.

**Savana Arborizada Sem Floresta de Galeria:** Subgrupo de formação natural ou antrópica, caracterizada pela presença de fisitofisionomia fanerofítica rala e outra hemicriptofítica graminóide contínua, sujeita ao fogo anual. Sua composição florística apresenta ecótipos dominantes que caracterizam os ambientes de acordo com o espaço geográfico ocupado.

**Savana Arborizada Com Floresta de Galeria:** Difere-se do subgrupo anterior por apresentar Floresta de Galeria sempre margeando os cursos d'água.

**Grão Irrigado:** Plantação de grãos, com utilização de irrigação por meio de pivô-central.

**Grão Sequeiro:** Área destinada ao plantio de grãos sem o emprego de nenhuma prática de irrigação.

**Fruticultura:** Área com o cultivo de frutos em geral, principalmente laranja e limão.

**Horticultura:** Áreas com o cultivo de hortaliças, geralmente com prática de irrigação.

**Gramma:** Área destinada a plantação de grama, com prática de irrigação.

**Cana/Capim:** Áreas com plantio da cultura de cana-de-açúcar ou capim forrageiro.

**Pastagem:** Compreende áreas destinadas ao pastoreio do gado, em boas condições ou em áreas antropizadas, que se encontram no estágio inicial ou em processo de regeneração.

**Eucalipto:** São áreas públicas ou particulares onde se encontram plantios homogêneos de eucalipto.

**Estradas Pavimentadas:** Principais vias de acesso, com recobrimento asfáltico. Foram mapeadas as principais estradas presentes na bacia, ficando as secundárias ou mesmo algumas principais incluídas em outras classes.

**Estradas Não Pavimentadas:** Vias de acesso de terra, sem recobrimento asfático, assim como a anterior também só foram delimitadas as principais.

**Chácara:** Grandes áreas parceladas onde há a predominância de seu uso para fins agrícolas e para o lazer. A classe chácara se refere a sede da chácara, terreno, que pode ser plantado com gramínea ou apresentar solo exposto.

**Fábrica:** Áreas destinadas a industrialização de produtos diversos.

**Loteamento:** Possui características ou são destinados a algum fim urbano porém são praticados em áreas rurais, o tamanho dos lotes são semelhantes aos encontrados em áreas urbanas e quase não são mais perceptíveis as práticas rurais.

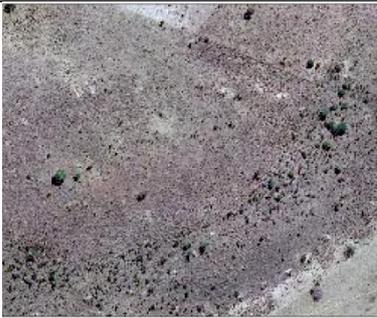
**Solo Exposto:** Apresenta áreas onde a cobertura vegetal foi removida deixando aparente qualquer dos horizontes do solo, decorrente de ações diversas.

**Mineração:** Área de extração de substâncias minerais, destinadas a fins diversos.

**Corpos d'água artificiais:** Compreende áreas com o uso para consumo doméstico, irrigação e dessedentação de animais, realizadas em represamentos.

As classes oriundas do mapeamento são apresentadas no Quadro 4:

Quadro 4: Imagens de cada classe de uso presente na Bacia do Alto Rio Jardim

		
Savana Parque sem Floresta de Galeria	Savana Arborizada sem Floresta de Galeria	Savana Arborizada com Floresta de Galeria
		
Grão Sequeiro	Grão Irrigado	Horticultura
		
Fruticultura	Cana/Capim	Grama

		
Corpos D'água	Eucalipto	Pastagem
		
Chácara	Fábrica	Loteamento
		
Estrada não Pavimentada	Mineração	Solo Exposto
Solo Exposto		
		
Estrada Pavimentada		

#### 4.3 Processamento dos dados de entrada

O delineamento automático baseado no MDE gerou sete sub-bacias, tendo como área mínima 500 hectares, onde a sub-bacia 5 foi criada apenas para receber as vazões das demais

sub-bacias, representando o exutório da área de drenagem total de estudo. Isso foi importante para evitar erros na modelagem, pois as respostas de vazão de todas as sub-bacias devem ser vertidos em uma sub-bacia específica, e como o exutório da bacia é muito próximo da confluência dos rios não foi possível a geração de uma sub-bacia com área semelhante a das demais (Figura 23).

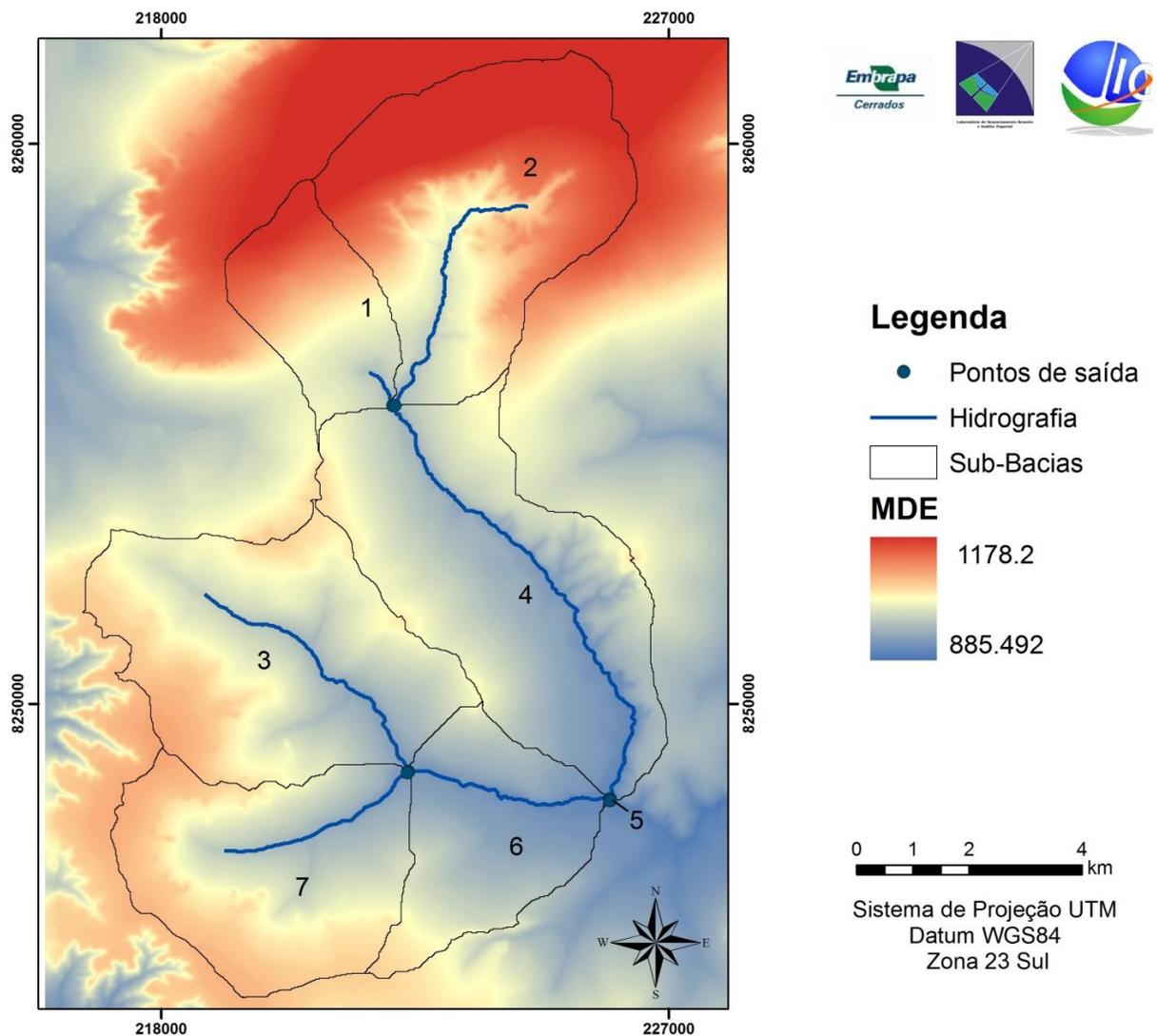


Figura 23: Sub-bacias, seus respectivos exutórios e hidrografia gerados pelo modelo SWAT para a Bacia Experimental do Alto Rio Jardim.

Após o delineamento da bacia e a definição das sub-bacias, o modelo calcula parâmetros como, área, declividade média, elevação (média, máxima e mínima), para cada sub-bacia. A área da bacia foi seccionada em três classes de declividade a partir do MDE (Figura 24), para que juntamente com os mapas de solos e uso da terra fossem definidas as HRU's.

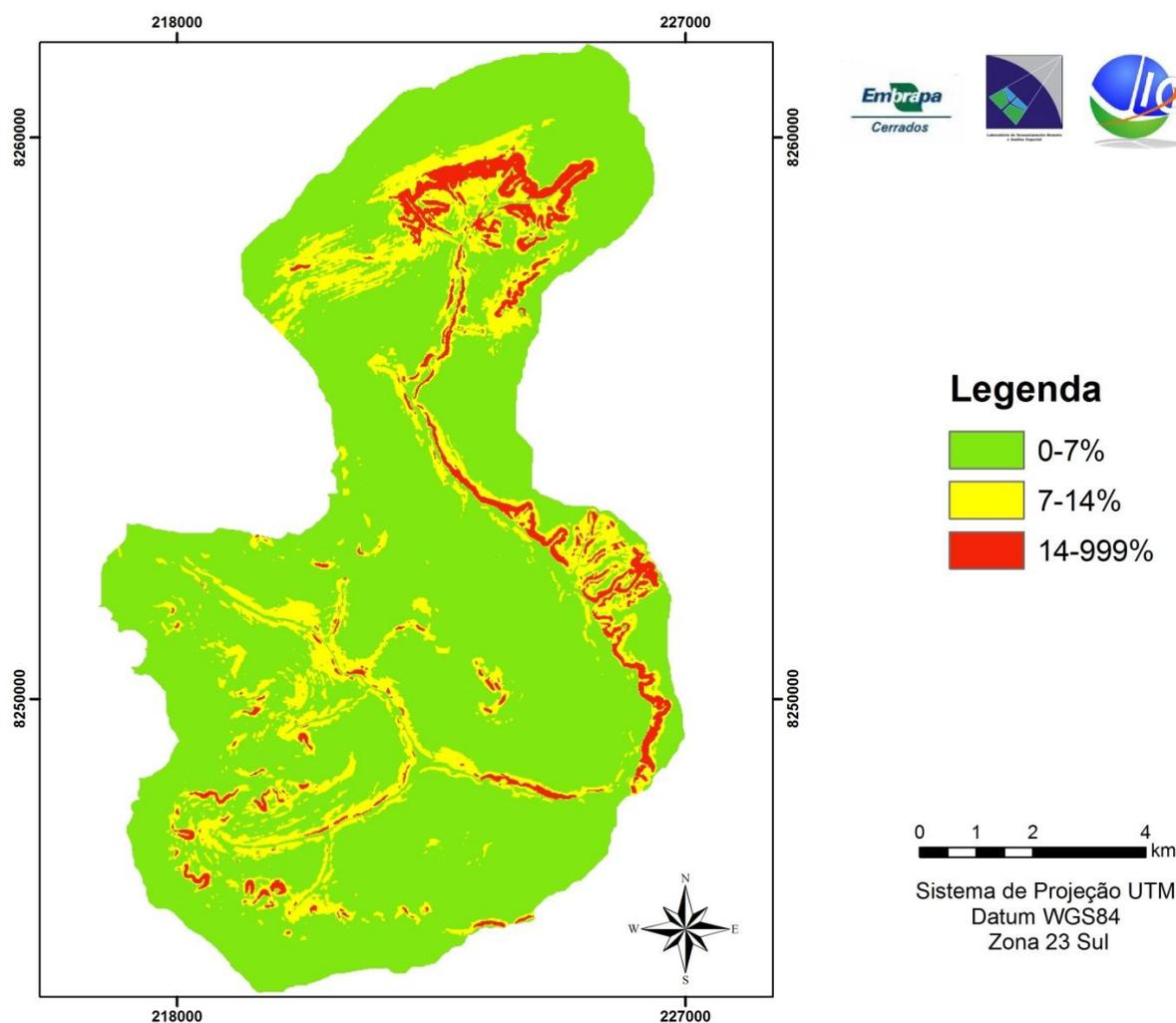


Figura 24: Classes de declividade da bacia do Alto Rio Jardim geradas a partir do MDE obtido por interpolação (topo to raster) dos dados topográficos das cartas 1:10.000.

A maior parte da bacia possui uma baixa declividade, sendo considerado como relevo plano a suavemente ondulado (Embrapa, 2006), ocupando uma área de 80,5 % da bacia, presente na classe que varia entre 0 e 7%. Representam 14,9% da área a declividade que oscila entre 7 e 14%, onde seu relevo é caracterizado como suave ondulado a ondulado (Embrapa, 2006). A menor porção, com 4,6% em área, compreende a classe acima de 14% de declividade, geralmente presente próximo as margens dos rios, onde o relevo pode ser considerado ondulado a fortemente ondulado (Embrapa, 2006).

Os mapas de solos e de uso foram reclassificados no modelo, agregando as informações tabeladas aos planos de informação espacial. Nas Tabelas 7 e 8 são apresentadas as classes de uso e de solos e suas respectivas áreas em porcentagem.

Tabela 7: Área das classes de uso da bacia do Alto Rio Jardim.

<b>Classes</b>	<b>Classes Reclassificadas</b>	<b>Área (%)</b>
Savana Parque sem Floresta de Galeria	Campo	5.5
Savana Arborizada sem Floresta de Galeria	Cerrado	8.4
Savana Arborizada com Floresta de Galeria	Mata de Galeria	5.7
Grão Irrigado	Milho	1.2
Grão Sequeiro	Soja	57.8
Horticultura	Agricultura Intensiva de pequeno porte	1.4
Fruticultura	Laranja	1.2
Cana/Capim Forrageiro	cana-de-açúcar	0.2
Gramma	Gramma	0.3
Pastagem	Pastagem	14.2
Eucalipto	Eucalipto	0.9
Fábrica	Industrial	0.1
Chácara	Urbanização de baixa densidade	1.3
Loteamento	Urbanização de média baixa densidade	0.1
Solo Exposto	Estrada não pavimentada	1.5
Estrada Pavimentada	Transporte	0.2
Corpos D'água	Água	0.1

Tabela 8: Área das classes de solo da bacia do Alto Rio Jardim (Adaptado de Reatto et al., 2000).

<b>Classe de Solo</b>	<b>Sigla</b>	<b>Área (%)</b>
Cambissolo	CX	16.8
Afloramento de Rocha	AFLR	0.2
Plintossolo	FX	2.4
Latossolo Vermelho	LV	41.5
Gleissolo	GX	2.3
Latossolo Vermelho Amarelo	LVA	23.0
Latossolo Amarelo	LA	11.8
Neossolo Quartzarênico	RQ	2.1

Com a sobreposição das informações de entrada foram geradas as HRU's. Como nenhum critério de corte foi definido para a exclusão de áreas mínimas, foram criadas 628 unidades de resposta hidrológicas (Figura 25), derivadas da sobreposição entre os oito tipos de solos, dezessete tipos de uso da terra e das três classes de declividade.

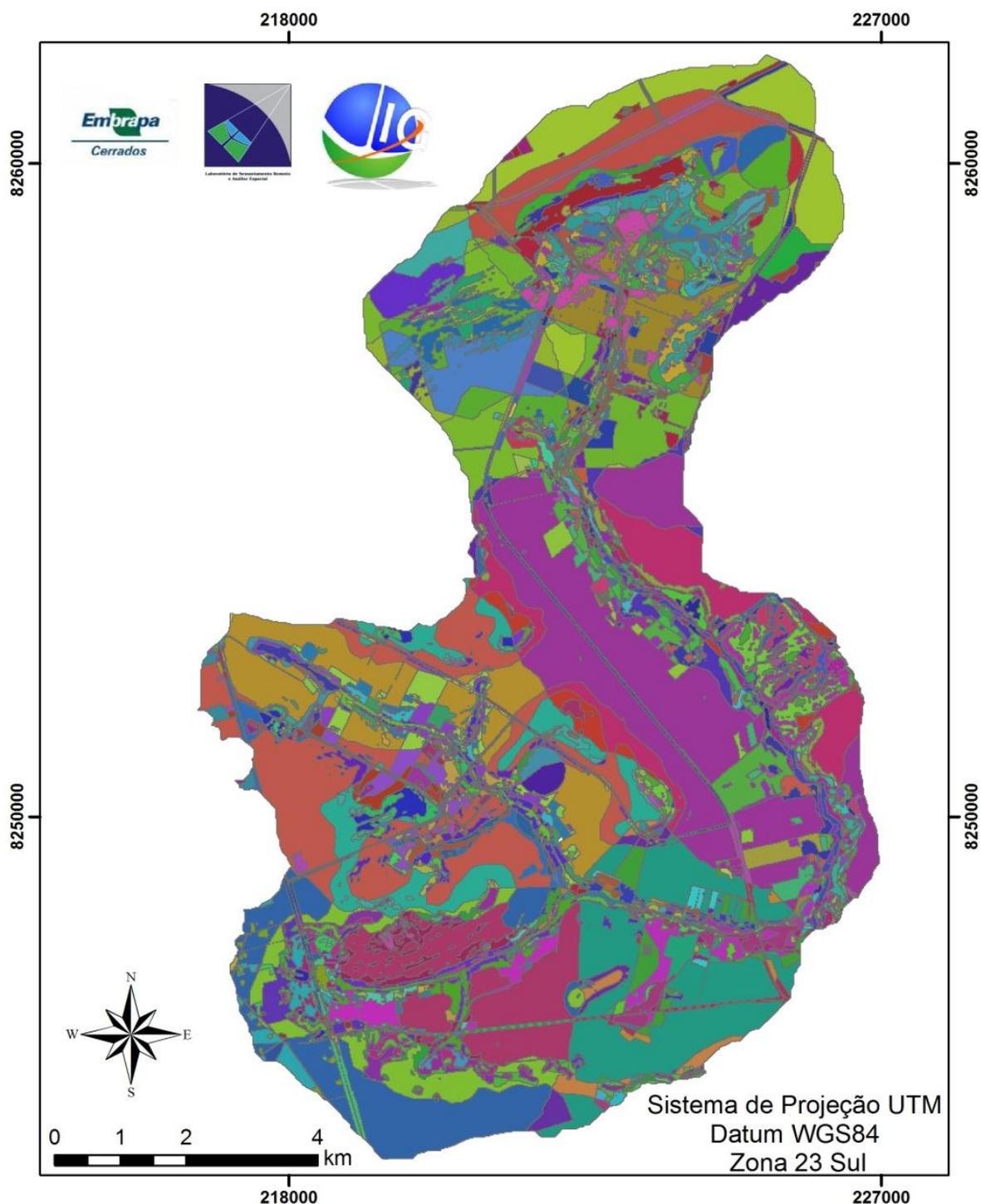


Figura 25: HRU's (Unidades de Resposta Hidrológica) geradas pelo SWAT.

#### 4.4 Simulação

A simulação hidrológica da bacia do alto rio Jardim foi realizada para dois anos hidrológicos, usando dados diários de precipitação. O resultado da simulação foi comparado aos dados da estação de vazão localizada no ponto exutório da bacia (estação Jardim Jusante), pelo mesmo período da simulação (01/07/2006 a 30/06/2008). Os dados de saída do modelo foram integrados no programa SWAT Check para visualização do balanço hídrico anual gerado (Figura 26).

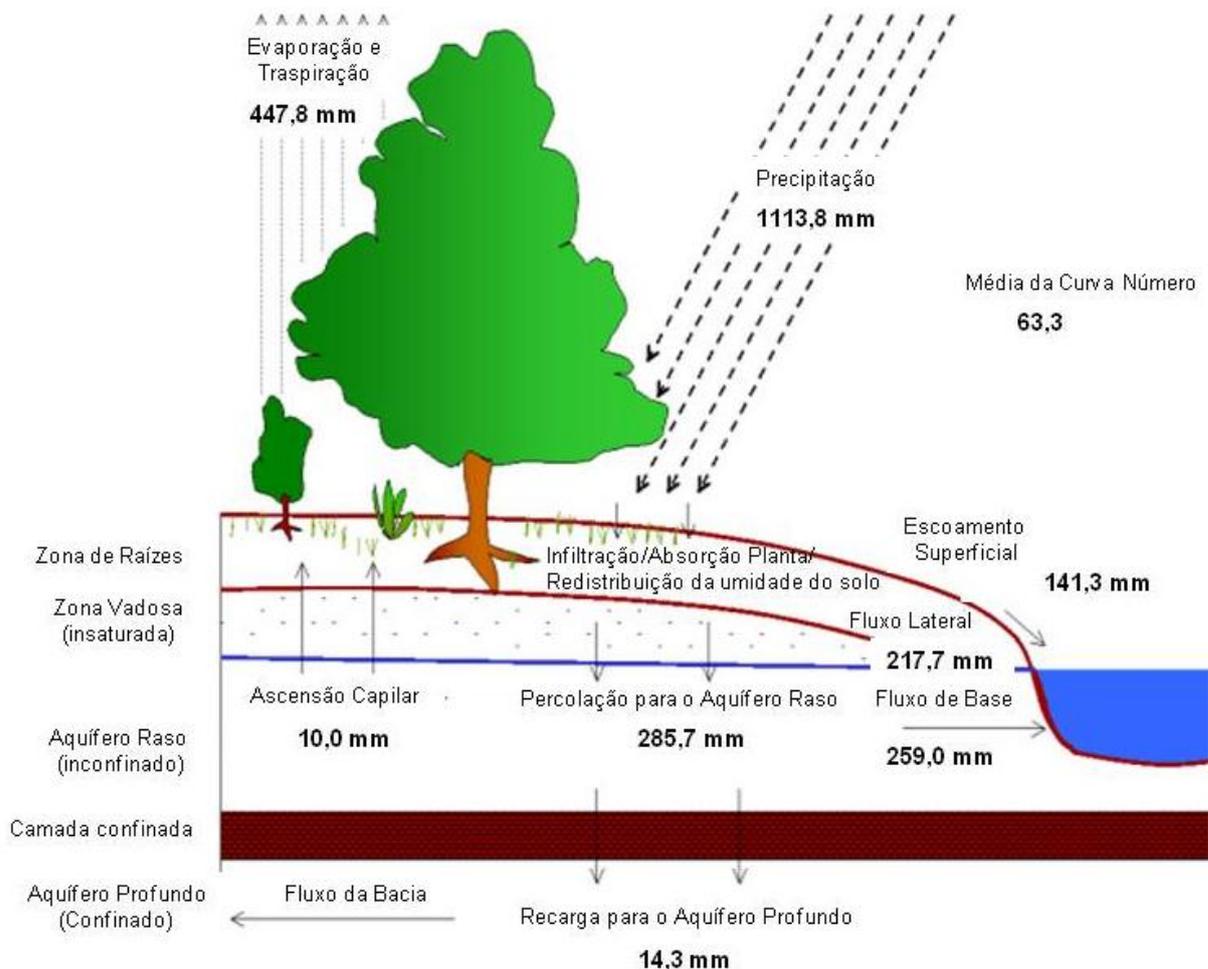


Figura 26: Balanço hídrico simulado pelo SWAT para o período de 2006 a 2008.

Na Figura 26 representa-se o ciclo hidrológico gerado na bacia por meio da modelagem com o SWAT. Conforme pode ser observado, a evapotranspiração compõe cerca de 447,8 mm, o escoamento superficial 141,3 mm, o fluxo lateral 217,7 mm, a percolação 285,7 mm, o fluxo de base 259,0 mm, a recarga para o aquífero profundo 14,3 e ascensão capilar do aquífero raso 10,00 mm. O CN médio para a bacia ficou em torno de 63.3. Lima

(2010) compilou alguns valores medidos que servem como referência para a representação do balanço hídrico em pequenas bacias do Distrito Federal (Tabela 9).

Tabela 9: Valores de referência para o balanço hídrico (Lima 2010).

<b>Referência</b>	<b>Silva e Oliveira (1999)</b>		<b>Lima 2000</b>		<b>Lima 2010</b>	
Ano hidrológico	1996/1997		1998/1999		2007/2008	
Bacia hidrográfica	Capetinga, DF		Capetinga DF		Alto Jardim, DF	
Área da bacia (km <sup>2</sup> )	10		10		104.86	
Variável	mm.ano	%	mm.ano	%	mm.ano	%
Precipitação	1.744,00	100,00	1.058,73	100,00	1.100,00	100,00
Escoamento superficial	52,50	3,01	15,08	1,42	32,33	2,94
Escoamento de base	444,00	25,46	284,39	26,86	289,89	26,35
Escoamento total	496,50	28,47	299,47	28,29	322,22	29,29
Variação da lâmina de água no solo	0,00	0,00	-71,77	-6,78	0,00*	0,00*
Evapotranspiração real	1.274,50	71,53	831,03	78,49	777,78	70,71

\*Valor não medido.

De acordo com estes estudos pode-se concluir, de maneira geral, que a modelagem apresentou um valor inferior para a evapotranspiração, quase a metade do valor esperado, superestimou o escoamento superficial e subestimou um pouco o fluxo de base. O passo seguinte foi comparar a distribuição temporal da vazão simulada com os dados observados, conforme o gráfico abaixo (Figura 27).

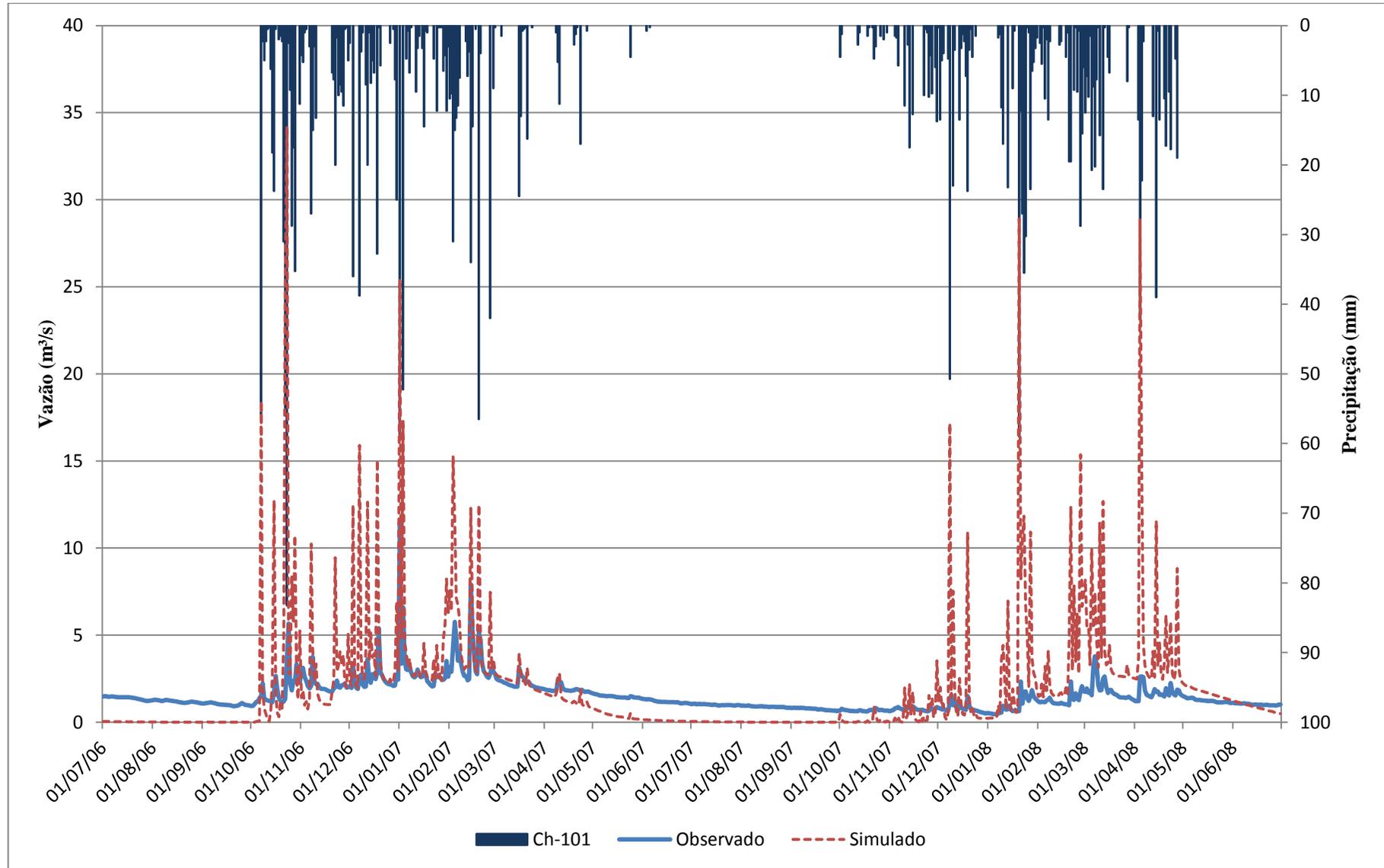


Figura 27: Gráfico comparando a vazão observada (Lima, 2010) e simulada no período de 2006 a 2008 em relação a precipitação para o mesmo período.

De acordo com a figura 27, nota-se que os picos de vazão foram superestimados pelo modelo em até três vezes, apresentando valores máximos de até  $34,19 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , onde os picos máximos observados não ultrapassam  $12 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Já o escoamento de base foi subestimado, apresentando em vários períodos valores iguais a zero, em alguns pontos, durante a estação seca, quando a vazão mínima observada no mesmo período apresenta um valor de  $0,46 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Resultados semelhantes foram verificados nos trabalhos de Ferrigo (2011) e Salles (2012), que também trabalharam com bacias agrícolas típicas do bioma cerrado no Distrito Federal.

Foram quantificados os valores do índice de eficiência de Nash e Sutcliffe (ENS) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para avaliar a eficiência da simulação. A modelagem apresentou um ENS igual a  $-10,81$  e um  $R^2$  igual a  $0,31$ , valores considerados insatisfatórios para simulações diárias de acordo com Green e Griesven. (2008). Na Figura 28 apresenta-se a dispersão dos dados simulados em relação aos dados observados, que demonstra que a distribuição dos dados não ocorre de maneira proporcional e que os dados simulados estão sendo superestimados na modelagem.

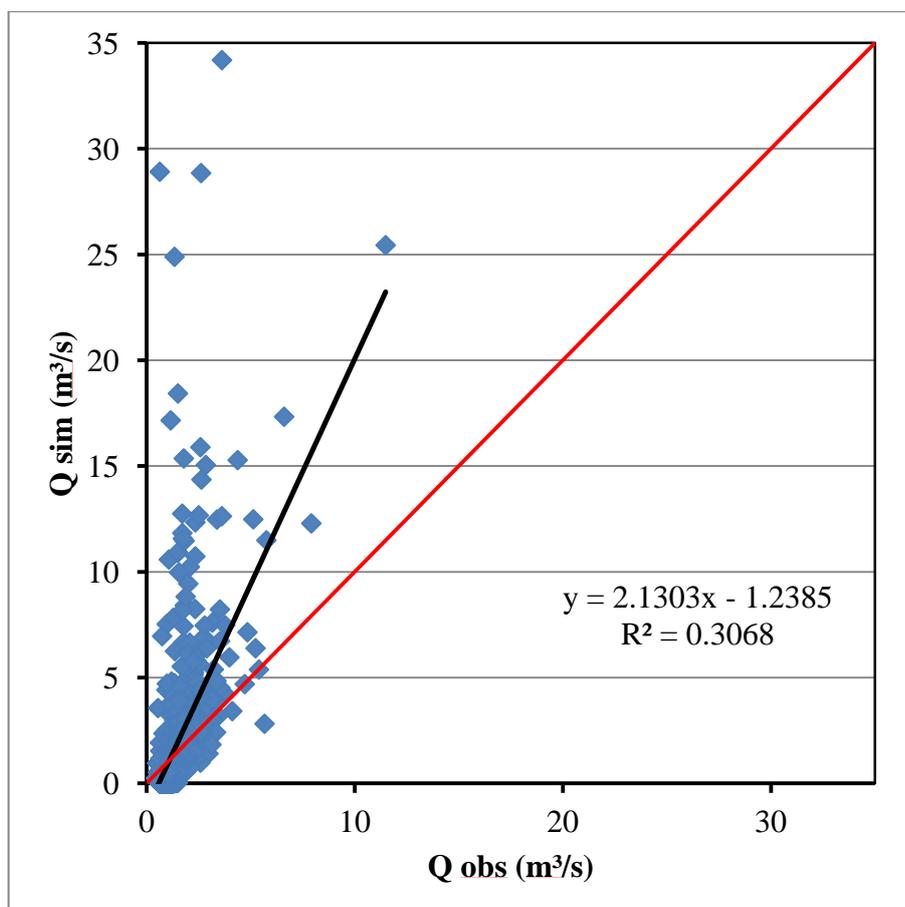
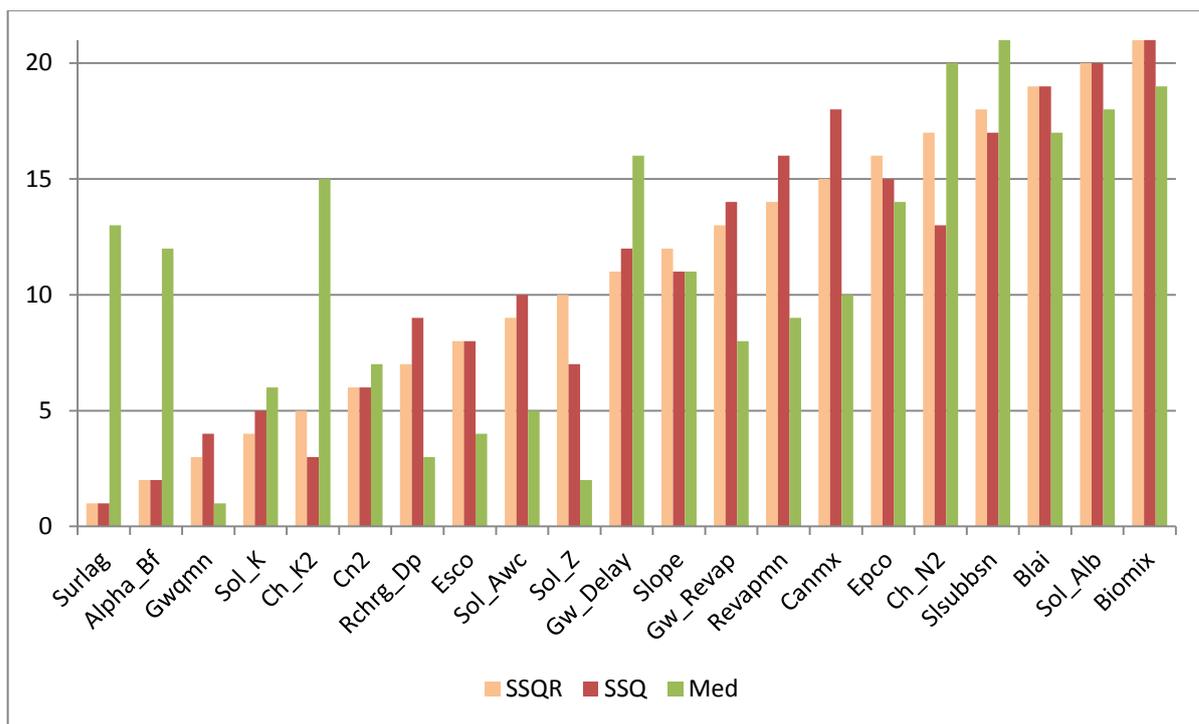


Figura 28: Gráfico mostrando a os dados de vazão simulada X vazão observada para a estação no exutório da bacia do Rio Jardim simulados.

Dessa forma, se verifica a necessidade de realizar a calibração do modelo, para que a simulação da vazão possa representar os dados observados de maneira mais satisfatória. Para que se pudesse realizar a calibração do modelo, foi realizada anteriormente uma análise de sensibilidade, que identificou quais parâmetros eram mais significativos para a modelagem e norteou o processo de calibração.

#### 4.5 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada no SWAT, pelo método LH-OAT, usando as funções objetivo Soma do Quadrado dos Resíduos (SSQ), e Soma do Quadrado dos Resíduos Ranqueada (SSQR), e a vazão média simulada. Os valores obtidos para essa simulação, bem como os parâmetros mais sensíveis à modelagem, são apresentados no gráfico a seguir (Figura 29).

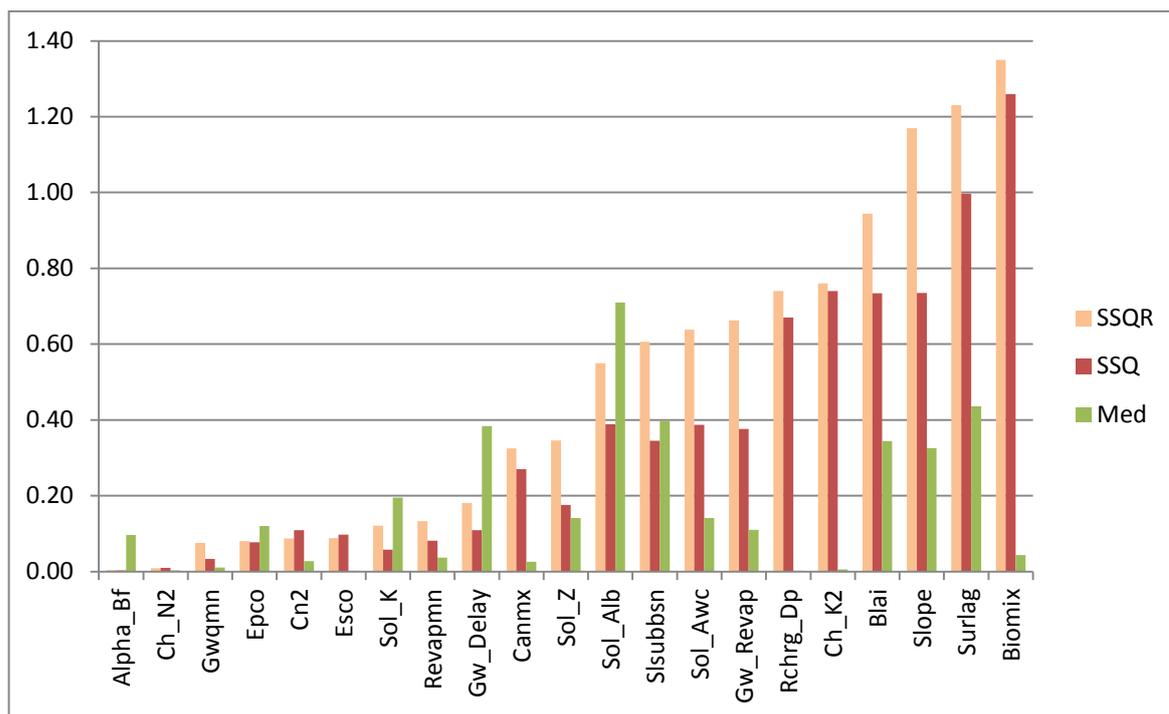


Nota: Alpha BF - Constante de recessão do escoamento de base; Biomix - Eficiência do revolvimeto biológico; Blai - Índice do potencial máximo de área foliar; Canmx - Armazenamento máximo do dossel; CN2 - Curva Número para a condição de umidade antecedente II; Ch\_K2 - Condutividade hidráulica do canal principal; Ch\_N2 - Coeficiente de rugosidade de Manning; Epco - Fator de compensação de água pelas plantas; Esco - Fator de compensação de evaporação do solo; GwDelay - Tempo de retardo da água subterrânea (dias); GWRevap - Coeficiente "revap" de água subterrânea; GWqmn - Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície; Rchrg\_Dp - Fração de água percolada para o aquífero profundo; Revapmn - Profundidade em aquífero profundo para que haja "revap"; Slope - Declividade média; Ssubbsn - Comprimento da declividade média (m); Sol\_Alb - Albedo do solo úmido; Sol\_Awc - Capacidade de água disponível no solo (mm h<sup>-1</sup>); Sol\_K - Condutividade hidráulica saturada dos solo (mm h<sup>-1</sup>); Sol\_Z - Profundidade da camada de solo (mm); Surlag - Coeficiente de retardo do escoamento superficial (dias).

Figura 29: Análise de sensibilidade, ranking da sensibilidade pelo método LH-OAT.

O gráfico acima representa o ranking de sensibilidade dos parâmetros, que varia de 1 a 21, onde o valor máximo é o mesmo que o número de parâmetros analisados, sendo que os valores mais próximos de 1 são considerados como tendo maior sensibilidade (Moriasi *et al.*, 2007). De acordo com a análise gráfica, é possível notar que os valores das funções objetivo SSQR e SSQ são muito próximos, já os valores para a vazão média simulada são mais divergentes. Assim considerando os valores das funções objetivo os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade foram: coeficiente de retardo do escoamento superficial (Surlag), constante de recessão do fluxo de base (Alpha-BF), condutividade hidráulica saturada do solo (Sol-K), Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície (GWQMN), curva número para a condição de umidade II (CN2), condutividade hidráulica do canal principal (CH-K2), fração de água percolada para o aquífero profundo (Rchrg-DP), Fator de compensação de evaporação do solo (Esco), capacidade de água disponível no solo (Sol AWC) e profundidade da camada de solo (Sol-Z). De acordo com a classificação de Griesven *et al.* (2006), os seis primeiros parâmetros do ranking são considerados (considerando os valores dos métodos SSQ e SSQR) como muito importantes, nesse caso, Surlag, Alpha-BF, GWQMN, Sol-K, CH-K2 e CN2 os demais são considerados pouco importantes.

No gráfico abaixo (Figura 30), mostra-se a distribuição da sensibilidade média dos parâmetros de acordo com as funções objetivo e com a média da vazão simulada.



Nota: Alpha BF - Constante de recessão do escoamento de base; Biomix - Eficiência do revolvimeto biológico; Blai - Índice do potencial máximo de área foliar; Canmx - Armazenamento máximo do dossel; CN2 - Curva Número para a condição de umidade antecedente II; Ch\_K2 - Condutividade hidráulica do canal principal; Ch\_N2 - Coeficiente de rugosidade de Manning; Epco - Fator de compensação de água pelas plantas; Esco - Fator de compensação de evaporação do solo; GwDelay - Tempo de retardo da água subterrânea (dias); GWRevap - Coeficiente "revap" de água subterrânea; Gwqmn - Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície; Rchrg\_Dp - Fração de água percolada para o aquífero profundo; Revapmn - Profundidade em aquífero profundo para que haja "revap"; Slope - Declividade média; Sbsubsn - Comprimento da declividade média (m); Sol\_Alb - Albedo do solo úmido; Sol\_Awc - Capacidade de água disponível no solo (mm h<sup>-1</sup>); Sol\_K - Condutividade hidráulica saturada dos solo (mm h<sup>-1</sup>); Sol\_Z - Profundidade da camada de solo (mm); Surlag - Coeficiente de retardo do escoamento superficial (dias).

Figura 30: Análise de Sensibilidade, sensibilidade média dos parâmetros de acordo com método LH-OAT.

De acordo com a classificação de Lenhart *et al.* (2002), que considera a sensibilidade média dos parâmetros, a sensibilidade para as funções objetivo foram bem semelhantes, já para os valores médios simulados a diferença foi mais acentuada. O Quadro 5, mostra o grau de sensibilidade média para cada parâmetro de acordo com cada função utilizada e a vazão média simulada.

Quadro 5: Classificação da análise de sensibilidade média dos parâmetros (Lenhart *et al.*, 2002).

Parâmetros	SSQR	SSQ	Med
Alpha_Bf	Baixa	Baixa	Média
Ch_N2	Baixa	Baixa	Baixa
Gwqmn	Média	Baixa	Baixa
Epco	Média	Média	Média
Cn2	Média	Média	Baixa
Esco	Média	Média	Baixa

Sol_K	Média	Média	Média
Revapmn	Média	Média	Baixa
Gw_Delay	Média	Média	Alta
Canmx	Alta	Alta	Baixa
Sol_Z	Alta	Média	Média
Sol_Alb	Alta	Alta	Alta
Ssubsn	Alta	Alta	Alta
Sol_Awc	Alta	Alta	Média
Gw_Revap	Alta	Alta	Média
Rchrg_Dp	Alta	Alta	Baixa
Ch_K2	Alta	Alta	Baixa
Blai	Alta	Alta	Alta
Slope	Muito Alta	Alta	Alta
Surlag	Muito Alta	Muito Alta	Alta
Biomix	Muito Alta	Muito Alta	Baixa

Nota: Alpha BF - Constante de recessão do escoamento de base; Biomix - Eficiência do revolvimeto biológico; Blai - Índice do potencial máximo de área foliar; Canmx - Armazenamento máximo do dossel; CN2 - Curva Número para a condição de umidade antecedente II; Ch\_K2 - Condutividade hidráulica do canal principal; Ch\_N2 - Coeficiente de rugosidade de Manning; Epc0 - Fator de compensação de água pelas plantas; Esc0 - Fator de compensação de evaporação do solo; GWDelay - Tempo de retardo da água subterrânea (dias); GWRevap - Coeficiente "revap" de água subterrânea; GWqmn - Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície; Rchrg\_Dp - Fração de água percolada para o aquífero profundo; Revapmn - Profundidade em aquífero profundo para que haja "revap"; Slope - Declividade média; Ssubsn - Comprimento da declividade média (m); Sol\_Alb - Albedo do solo úmido; Sol\_Awc - Capacidade de água disponível no solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ); Sol\_K - Condutividade hidráulica saturada dos solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ); Sol\_Z - Profundidade da camada de solo (mm); Surlag - Coeficiente de retardo do escoamento superficial (dias).

Para a função objetivo SSQR três parâmetros apresentaram sensibilidade média muito alta (Biomix, Surlag e o Slope), nove parâmetros apresentaram alta sensibilidade, sete possuem sensibilidade classificada como média e dois parâmetros tem baixa sensibilidade. Para a função SSQ dois parâmetros possuem sensibilidade muito alta (Biomix e Surlag), sete parâmetros possuem uma sensibilidade mediana, e três possuem baixa sensibilidade. Os parâmetros mais importantes encontrados pelas duas funções foram praticamente os mesmos, modificando-se apenas a classe para alguns. Já para a vazão média nenhum parâmetro foi classificado com uma sensibilidade muito alta, seis parâmetros foram classificados com alta sensibilidade, e outros seis com sensibilidade média e nove parâmetros foram caracterizados com baixa sensibilidade.

As duas formas de avaliar os resultados de sensibilidade dos parâmetros obtiveram respostas bem diferentes, parâmetros que aparecem como alta sensibilidade segundo a análise do *ranking* apresentaram baixa ou média sensibilidade de acordo com a análise da sensibilidade média dos parâmetros (Alpha-BF, GWQMN e CN2), da mesma forma

ocorreram parâmetros com pouca sensibilidade para a primeira análise que apresentaram alta ou muito alta sensibilidade conforme a segunda análise (Slope, Biomix, Blai e Sol\_AlB).

Dessa forma, considerando as duas análises e tendo como referências as classificações de Griesven *et al.* (2006) e Lenhart *et al.* (2002), os parâmetros identificados como mais sensíveis para a modelagem na bacia do alto rio Jardim foram, Surlag, Alpha-BF, CN2, GWQMN, Sol-K, CH-K2, Slope, Slsubbsn, Blai e Sol-Alb, sendo que para a sensibilidade média dos parâmetros foram considerados apenas os parâmetros com muito alta ou alta sensibilidade nos três métodos empregados.

Fazendo uma breve revisão da literatura, foram extraídos de alguns trabalhos, os parâmetros mais sensíveis de cada um, que podem ser representativos para análise de sensibilidade dos parâmetros para a realidade brasileira (Quadro 6).

Quadro 6: Parâmetros mais sensíveis para a simulação do SWAT no Brasil.

Parâmetros mais sensíveis	Autores	Região
Esco, Alpha-BF, Sol-Z, GW-QMN, GW-delay, Sol-AWC, Revapmn, Surlag, GW-revap, CN2	Durães 2010	Sudeste
Esco, Sol-AWC, Slope, CN2, Slsubbsn	Rocha <i>et al.</i> 2010	
Esco, Alpha-BF, Epc, Sol-Z, Canmx, CH-K2, Sol-AWC, Sol-K, CN2	Lelis <i>et al.</i> 2012	
CN2, Alpha-BF, Rchrg-DP, Esco, Sol-Z, Sol-AWC, Sol-K,	Andrade <i>et al.</i> 2013	
CH-K2, Slope, Esco, Alpha-BF, Sol-Z, Sol-K, Sol-AWC, Surlag, CN2, CH-N	Baltokoski 2008	Sul
Esco, Alpha-BF, Sol-Z, Canmx, Sol-AWC, Sol-K, CN2, Slope, Blai, GW-QMN	Lopes 2008	
Esco, Alpha-BF, CH-K2, Canmx, Sol-AWC, Sol-K, CN2, Slope, Blai, GW-QMN	Bonumá <i>et al.</i> 2010	
Esco, Alpha-BF, Sol-Z, Canmx, Sol-AWC, CN2, Slope, Blai, GW-QMN, Revapmn	Garbossa <i>et al.</i> 2010	
Esco, Alpha-BF, GW-delay, Surlag, CN2	Lino <i>et al.</i> 2009	
Esco, Alpha-BF, Sol-Z, Canmx, Sol-AWC, Slope, Blai, GW-QMN, Revapmn, Sol-K	Paim e Menezes 2009	

Esco, Alpha-BF, Sol-Z, Sol-AWC, Blai, GW-QMN, Revapmn, CH-K2, CN2, GW-revap	Malutta 2012	
Esco, Alpha-BF, Sol-Z, Sol-AWC, Blai, GW-QMN, CN2, Canmx, Slope, Sol-K	Lubitz 2009	
Surlag, GW-revap, CN2, Gw-Revap, Rchrg-DP, Sol-Z.	Sarmento 2010	Centro-Oeste
CN2, Alpha_BF, CH-K2, Esco, GW-Delay, CH-N2, GW-QMN, Canmx, Surlag.	Strauch <i>et al.</i> 2011	
Alpha_BF, CN2, GW-Delay, GW-QMN, Gw-Revap, Esco, Ssubsn.	Ferrigo <i>et al.</i> 2012	
Esco, Alpha-BF, GW-QMN, Surlag, GW-revap, CN2, CH-K2, Rchrg-DP, CH-N2, Revapmn	Salles 2012	

Nota: Alpha BF - Constante de recessão do escoamento de base; Biomix - Eficiência do revolvineto biológico; Blai - Índice do potencial máximo de área foliar; Canmx - Armazenamento máximo do dossel; CN2 - Curva Número para a condição de umidade antecedente II; Ch\_K2 - Condutividade hidráulica do canal principal; Ch\_N2 - Coeficiente de rugosidade de Manning; Epc - Fator de compensação de água pelas plantas; Esco - Fator de compensação de evaporação do solo; GWDelay - Tempo de retardo da água subterrânea (dias); GWRevap - Coeficiente "revap" de água subterrânea; GWqmn - Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície; Rchrg\_Dp - Fração de água percolada para o aquífero profundo; Revapmn - Profundidade em aquífero profundo para que haja "revap"; Slope - Declividade média; Ssubsn - Comprimento da declividade média (m); Sol\_Alb - Albedo do solo úmido; Sol\_Awc - Capacidade de água disponível no solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ); Sol\_K - Condutividade hidráulica saturada dos solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ); Sol\_Z - Profundidade da camada de solo (mm); Surlag - Coeficiente de retardo do escoamento superficial (dias).

Conforme observado no Quadro 6, os parâmetros mais sensíveis para as bacias não variam muito, diferenciado-se pouco de uma bacia para outra bacia, independente até mesmo da região estudada, o que induz a crer que os parâmetros que mais se repetem nos diferentes estudos, são os que causam um impacto significativo no processo de modelagem nas bacias brasileiras, para a estimativa do fluxo de água.

No entanto deve-se ressaltar que apesar destas semelhanças, nem sempre os parâmetros com maior sensibilidade são realmente usados no período de calibração. Abbaspour (2011) relata que se houver um conjunto de dados que se ajuste as medições, haverá na realidade um conjunto deles que se ajustarão, assim, diferentes conjuntos de dados podem produzir respostas semelhantes em relação a descarga observada.

#### 4.6 Calibração

O período correspondente à 01/07/2006 a 30/06/2007, apresentou um NS de -8, 16 e um  $R^2$  de 0,43. Na Figura 31 mostra-se o gráfico da vazão observada e da vazão simulada para esse período.

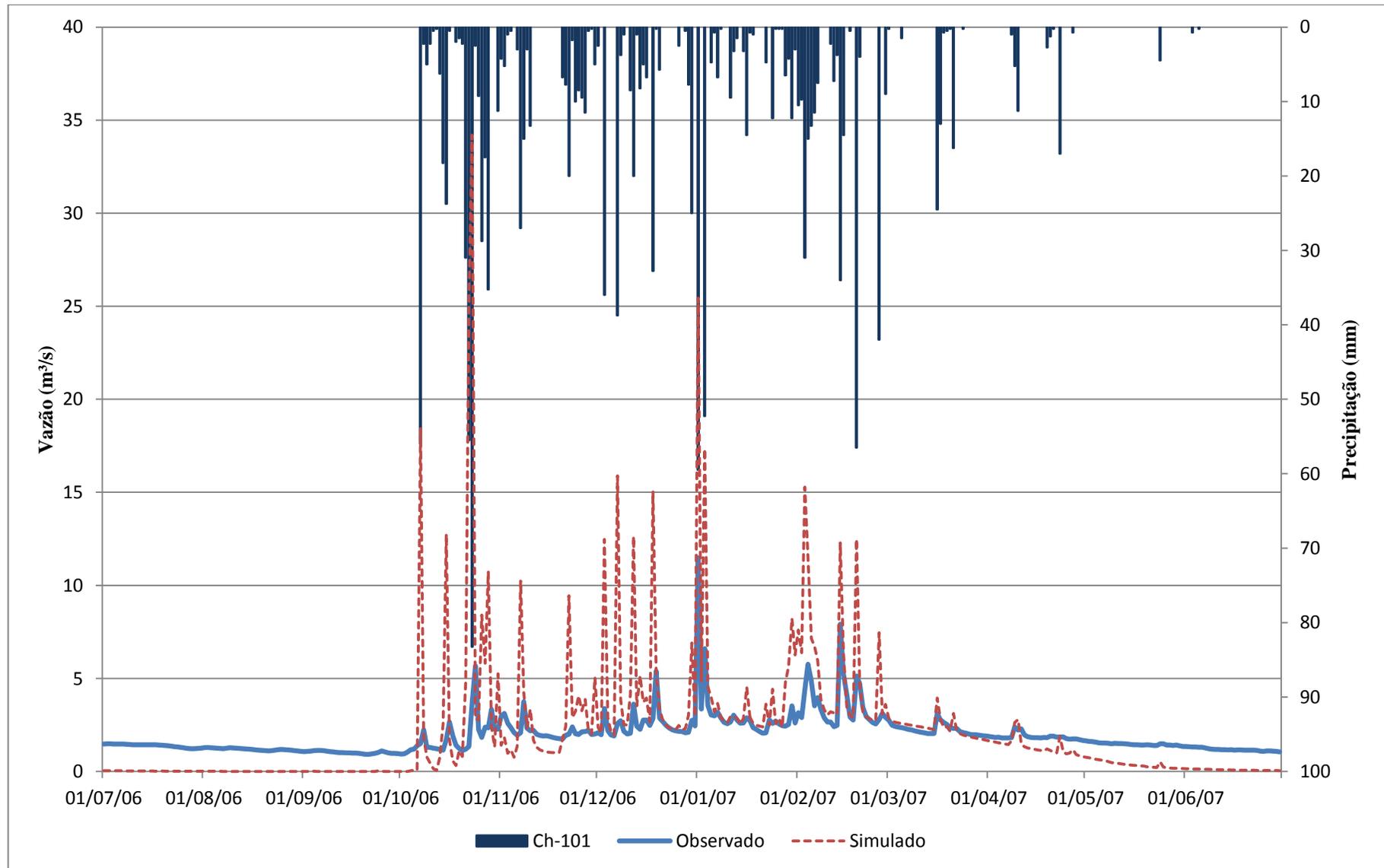


Figura 31: Gráfico da vazão observada (Lima 2010) e simulada no período de 2006 a 2007.

A calibração do modelo foi realizada para a vazão diária, de forma manual, referente ao período citado acima (01/07/2006 a 30/06/2007). Os dados observados utilizados para a calibração correspondem a estação fluviográfica do ponto exutório da bacia (estação Jardim Jusante). Após a análise de sensibilidade do modelo definiu-se quais os parâmetros seriam utilizados para a calibração.

O ajuste dos parâmetros foi realizado em etapas de modo que as alterações atendessem aos valores de referência do balanço hídrico para a bacia (Tabela 10) e representassem de maneira satisfatória a vazão de saída. Os parâmetros utilizados para a calibração do modelo foram: armazenamento máximo do dossel (Canmx), curva número para a condição de umidade II (CN2), coeficiente de retardo do escoamento superficial (Surlag), condutividade hidráulica saturada do solo (Sol-K), fator de compensação da evaporação do solo (Esco), profundidade limite de água para o aquífero raso (GW-QMN), tempo de atraso da água subterrânea (GW-delay), constante de recessão do fluxo de base (Alpha-BF) e fração de recarga para o aquífero profundo (Rechrg-DP). A tabela 10, apresenta o valor inicial e final para cada um dos parâmetros modificados, e o método empregado para a alteração.

Tabela 10: Variação dos valores (inicial e final) para os parâmetros utilizados na calibração e o método de variação.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor Inicial</b>	<b>Valor Final</b>	<b>Método</b>
CN2	Variável por classe	0.8	Multiplicação (%)
ALPHA-BF	0.048	0.1	Substituição
SURLAG	4	0.01	Substituição
SOL-K	Variável por classe	0.5	Multiplicação (%)
CANMX	0	15	Substituição
RCHRG-DP	0.05	0.02	Substituição
ESCO	0.95	0.01	Substituição
GW-DELAY	31	180	Substituição
GW-QMN	0	-1	Substituição

Considerando que o modelo SWAT trabalha como se fosse um conjunto de reservatórios que operam em sequência, onde o primeiro alimenta o segundo e assim sucessivamente, buscou-se primeiro adequar os valores para evapotranspiração e o escoamento superficial, para isso alterou-se o parâmetro Canmx, que controla a retirada da água do sistema por interceptação pelas plantas e conseqüentemente altera a

evapotranspiração. Neste caso o objetivo da mudança foi aumentar a evapotranspiração aumentando o valor deste parâmetro. Depois alterou-se o parâmetro CN2, curva número para a condição antecedente II, de forma a diminuir o escoamento superficial e por conseguinte aumentar a infiltração, alterou-se também o Surlag, coeficiente de retardo do escoamento superficial, uma vez que a bacia possui um tempo de resposta rápido para o escoamento superficial.

Uma vez ajustados estes parâmetros foram modificados os valores dos parâmetros que influenciam na rotina de água no solo e de água subterrânea. Primeiro alterou-se o valor de Sol-K, condutividade hidráulica do solo, visando um aumento da água para as camadas mais baixas do perfil de solo, controlando assim o aumento da água disponível para a percolação e para o fluxo de base. Com uma maior quantidade de água nas camadas mais profundas do solo, alterou-se o valor do parâmetro Esco, fator de compensação de evaporação do solo, para aumentar a demanda evaporativa do solo pelas camadas inferiores. Posteriormente, foram modificados os parâmetros GW-QMN, limite entre a profundidade de água entre o aquífero raso e a superfície, GW-delay, tempo de retardo da água subterrânea e Alpha-BF, constante de recessão do escoamento de base, todos ligados a água subterrânea, o primeiro foi alterado para ajustar a profundidade da água entre o aquífero raso e a superfície, o segundo foi modificado em virtude da bacia ter uma resposta mais lenta da água subterrânea para a descarga no rio e último foi modificado para aumentar o volume de água no fluxo de base, buscando-se, principalmente, elevar a vazão mínima nos períodos de estiagem. O último parâmetro modificado foi o RCHRG-DP, fração de água percolada, este foi modificado para que menos água do fluxo de base ficasse disponível para a recarga do aquífero. Na Figura 32 apresenta-se o gráfico com a vazão observada e a vazão simulada após a calibração da modelagem.

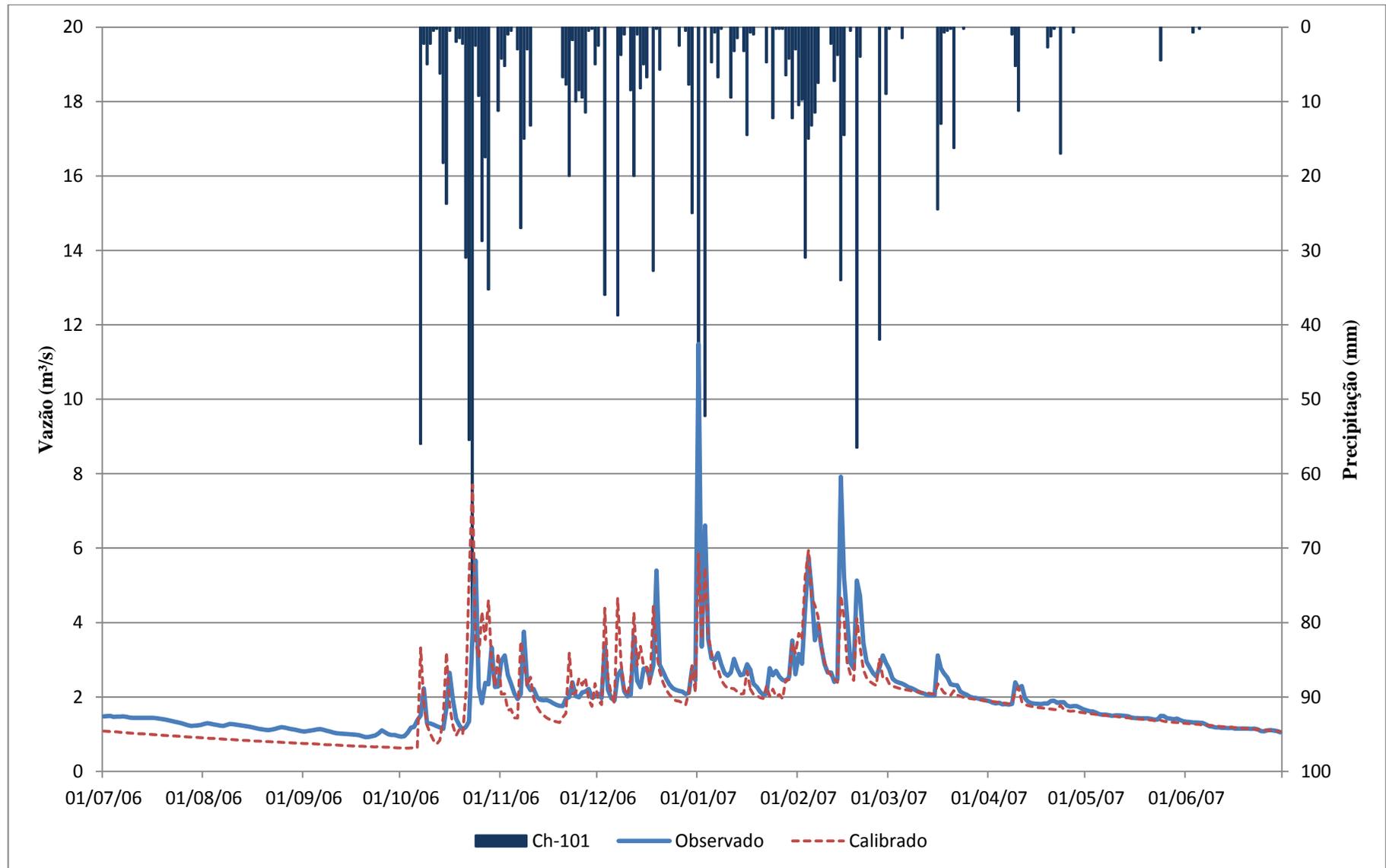


Figura 32: Gráfico da vazão observada (Lima, 2010) e simulada no período de 2006 a 2007 (dados calibrados).

Após calibrado o modelo, pode-se observar que houve uma melhora significativa do ajuste do fluxo de base, principalmente, no período de seca onde os dados simulados chegavam a zero. A vazão mínima alcançada pelo modelo depois de calibrado para esse período, foi de  $0,62 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , enquanto os dados observados apresentam valor mínimo de  $0,92 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Os valores dos picos também foram ajustados com uma redução considerável dos eventos extremos simulados quando comparados a primeira simulação (figura 28). Entretanto, como haviam picos com valores muito altos o ajuste não conseguiu representar a todos com a mesma eficiência, sendo que alguns picos foram subestimados e outros apesar de minimizados permaneceram maiores que os observados. Os valores mais altos apresentados pela vazão observada chegam a  $11,48 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  e para vazão simulada após a calibração atingem  $7,70 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , enquanto que o valor para o mesmo período antes da calibração era de  $34,19 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

A calibração apresentou valor de 0,60 e de 0,66 para o ENS e  $R^2$  respectivamente. Este valores são superiores a 0,4 para o ENS e 0,5 para o  $R^2$ , os quais são considerados satisfatórios por Green *et al.* (2008), para o caso de uma modelagem com dados diários. Nos gráficos das Figuras 33 e 34 é apresentada a variação dos dados simulados em relação a vazão observada antes e depois da calibração respectivamente.

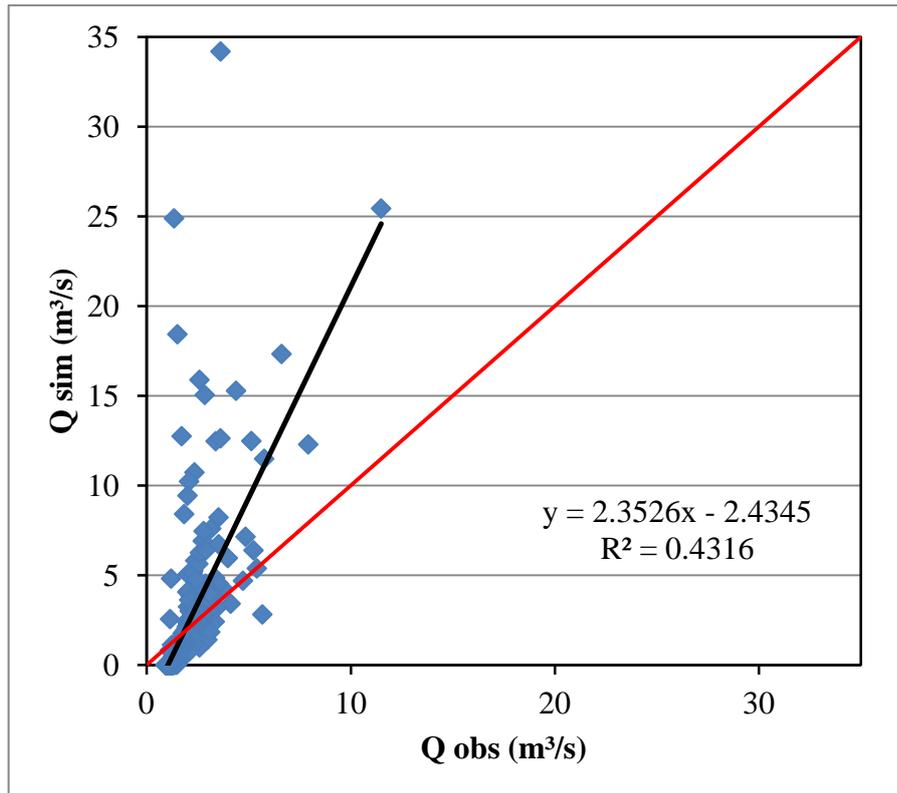


Figura 33: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 2006 a 2007 (dados sem calibração).

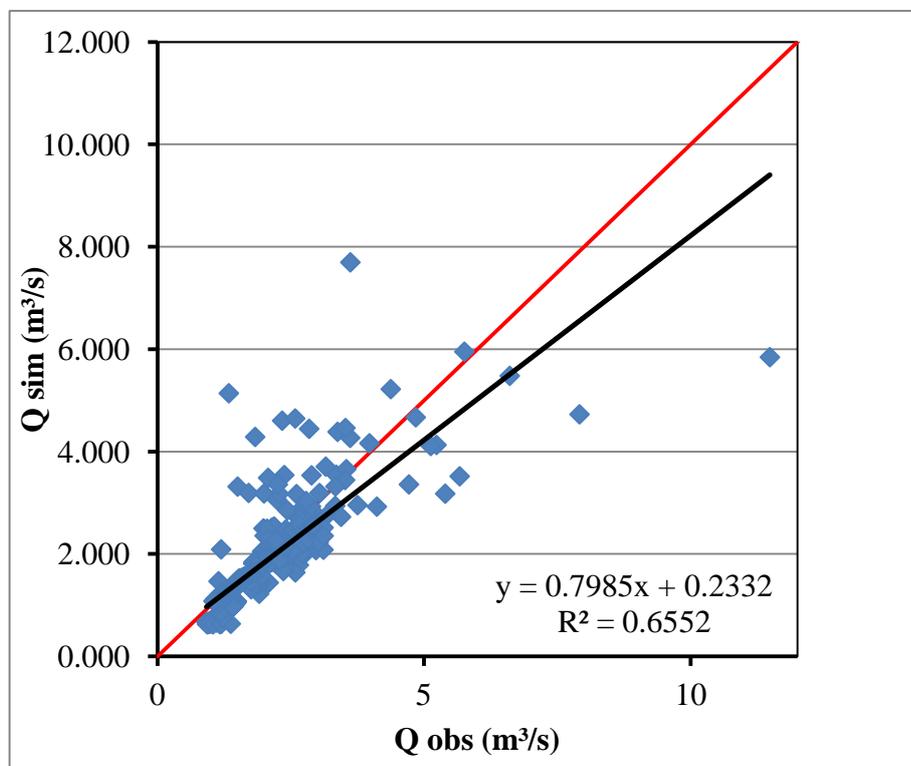


Figura 34: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 2006 a 2007 (dados calibrados).

Nota-se por meio desses gráficos que houve uma melhora significativa entre a primeira simulação e a última com parâmetros calibrados, principalmente para os picos de vazão. Pode-se observar também que houve melhor distribuição dos dados em relação à reta de tendência aproximando de 1.

Garbossa *et al.* (2011) apresenta uma revisão sobre trabalhos realizados com o SWAT no Brasil, neste artigo ele apresenta uma compilação com os trabalhos realizados e os valores estatísticos empregados para as calibrações e validações, bem como o período e o intervalo de observação (diário, mensal e anual) utilizados.

Os trabalhos realizados com calibração mensal são mais comumente encontrados. Trabalhos que adotam a calibração de dados diário são menos frequentes. Os trabalhos de Garrido (2003), Pereira *et al.* (2005), Paiva & Paiva (2006), Adriolo *et al.* (2008), Lopes e Kbyama (2008), Gilbertoni *et al.* (2009), e Shutz *et al.* (2010) são algumas das referências que utilizaram a calibração com dados diários no Brasil. Destes trabalhos, apenas Gilbertoni *et al.* (2009) e Shultz *et al.* (2010) conseguiram valores ENS superiores a 0,4, para o período de calibração.

Baltokoski (2008) realizou estudos nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiros nos municípios de Pato Branco e Maropólis (PR), para avaliar a sensibilidade do modelo SWAT na predição da vazão e do fluxo de massa de fósforo total, a calibração para o fluxo foi realizada com dados diários. A modelagem foi realizada para duas estações fluviométricas. Para a estação PC02 ele encontrou resultados satisfatórios (ENS = 0,61), já para a estação RP02 a calibração não apresentou uma resposta satisfatória.

Durães (2010) avaliou a caracterização do estresse hidrológico na bacia do Rio Paraopeba, Minas Gerais, para a simulação do fluxo de água, ele encontrou valores superiores a 0,75 para o índice de eficiência de Nash e Sutcliffe no período de calibração diária do modelo.

O resultado do balanço hídrico para o período de calibração apresentou os seguintes resultados, 576,1 mm do total da chuva foi convertido em evapotranspiração, 58,55 mm em escoamento superficial, 134,13 mm em fluxo lateral, 361,54 mm em água disponível para percolação, 354,48 mm em fluxo de base, 10,93 mm em ascensão capilar do aquífero raso, e 7,23 para a recarga do aquífero (Figura 35).

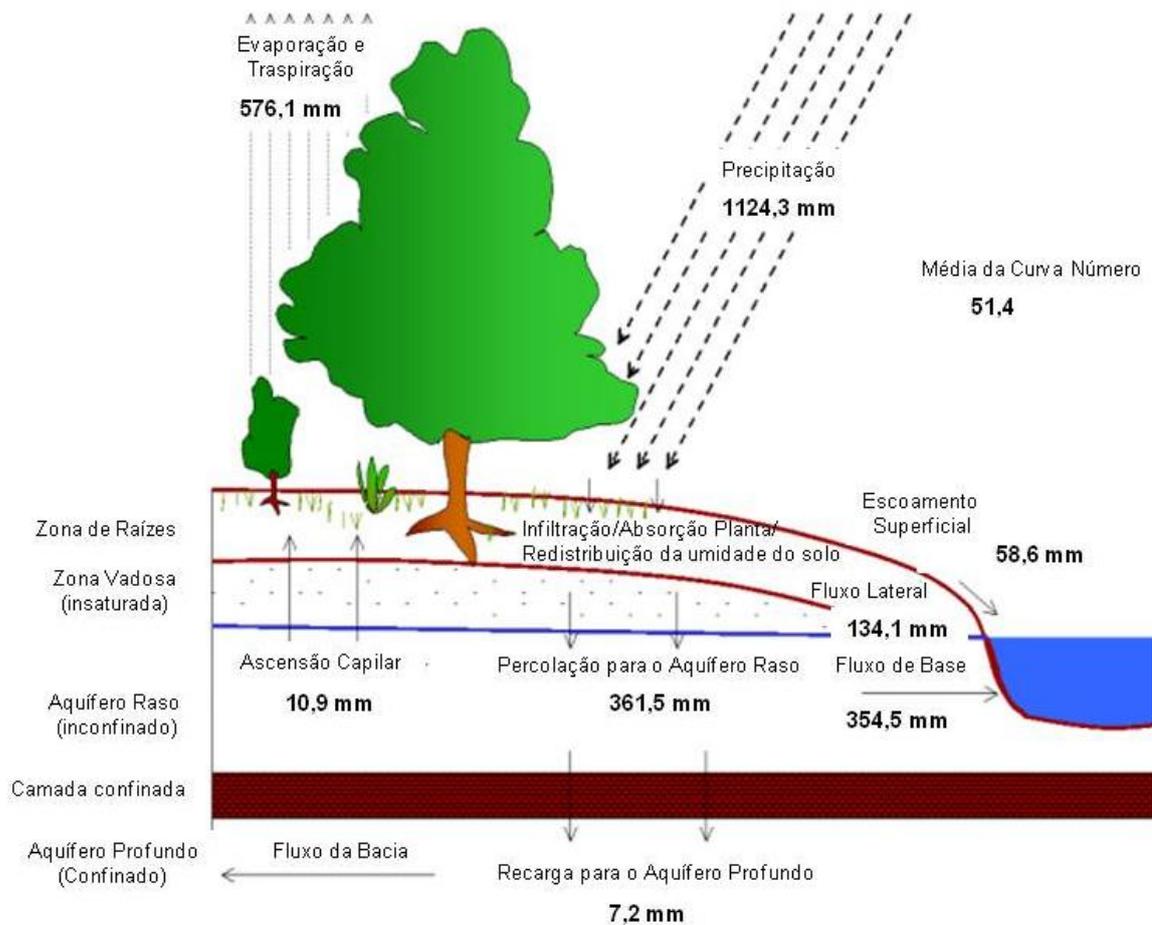


Figura 35: Balanço hídrico simulado pelo SWAT para o período de 2006 a 2007 (dados calibrados).

#### 4.7 Validação

Os valores de ENS e  $R^2$  para o período de 01/07/2007 até 30/06/2008 foram respectivamente de -45,66 e 0,33. Na Figura 36, são comparados os valores dos dados observados e os valores iniciais dos dados simulados.

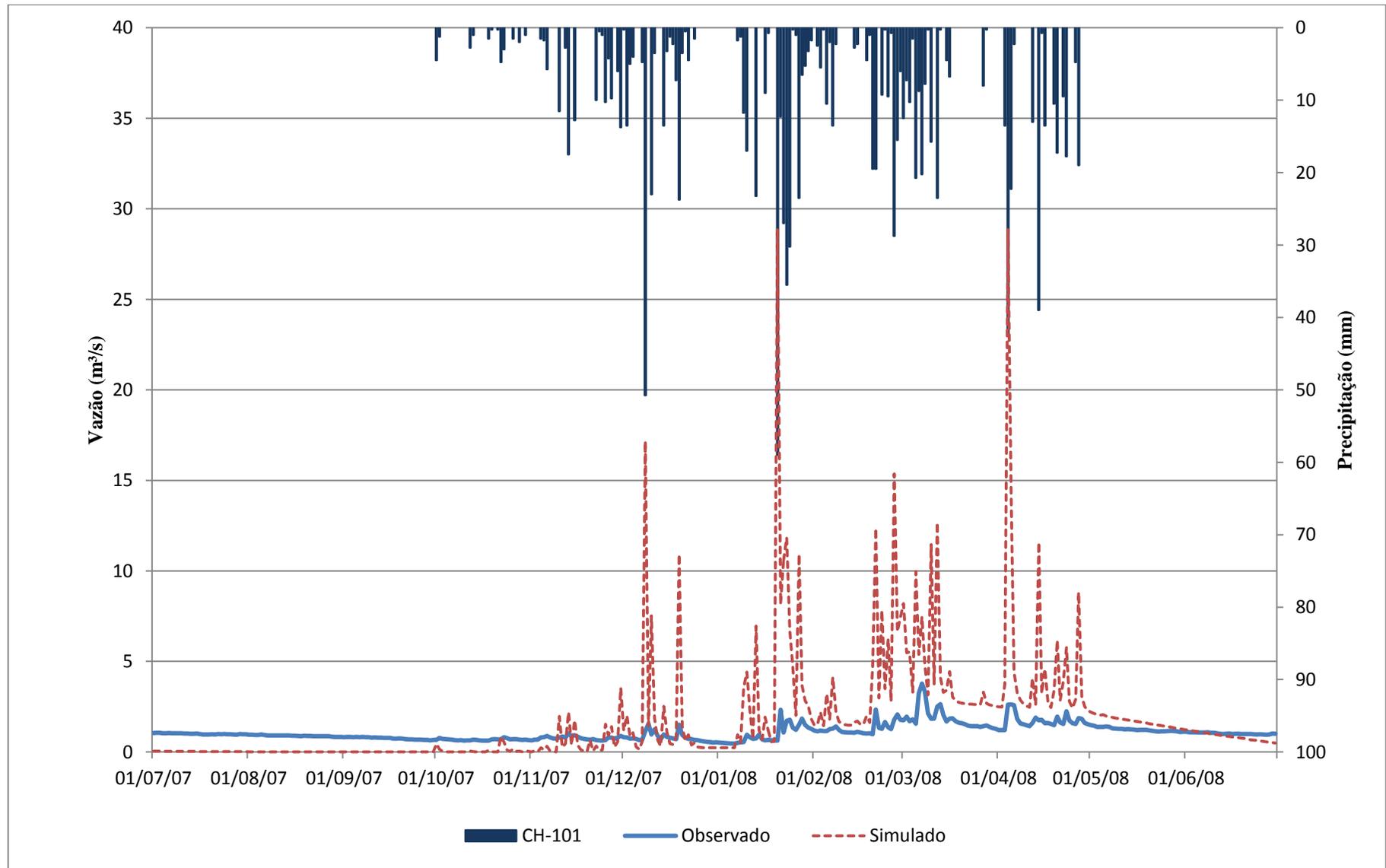


Figura 36: Gráfico da vazão observada (Lima, 2010) e simulada no período de 2007 a 2008 (sem calibração).

Como pode ser observado na figura 36, o mesmo ocorreu para o primeiro ano se repetiu no segundo, o valor simulado apresenta uma subestimação do fluxo de base no período de seca e uma superestimativa para os valores dos picos, sendo que além disso apresenta uma superestimativa do fluxo de base para o período de março a maio de 2008. O valor mínimo registrado para a vazão observada foi de  $0,46 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  enquanto que para a vazão simulada foram obtidos valores iguais a zero, para a vazão de pico o valor máximo observado é de  $3,78 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e o valor obtido na modelagem atinge  $28,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Foram empregados os mesmos valores dos parâmetros obtidos no período de calibração para a validação do modelo. Os dados de vazão observados e a vazão simulada para o período de validação foram comparados (Figura 37). Foi obtido um ENS de  $-0,84$  e um  $R^2$  de  $0,66$ . Por meio da análise do gráfico é possível observar que mesmo com a alteração de alguns parâmetros na calibração, os dados simulados na validação não possuem a mesma aproximação entre a vazão simulada e observada, comparando-se com o período de calibração.

Os dados simulados na validação apresentaram uma boa representatividade para o fluxo de base no período de junho de 2007 a janeiro de 2008, a partir desse período o modelo não conseguiu retornar o fluxo de base para valores próximos aos observados depois da recessão dos picos de vazão, e ainda para o período de estiagem que vai de maio a junho de 2008, o fluxo de base foi superestimado. Pode-se notar ainda valores superestimados para os picos de maneira geral.

O valor mínimo obtido para a vazão simulada, depois de alterados os parâmetros na calibração, foi um valor de  $0,44 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , para a vazão de pico o valor máximo encontrado na modelagem atinge  $5,22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Dessa forma, pode-se afirmar que a validação do modelo não apresentou valores satisfatórios, de acordo com o proposto para calibração diária, segundo a literatura, pois obteve um valor de ENS negativo.

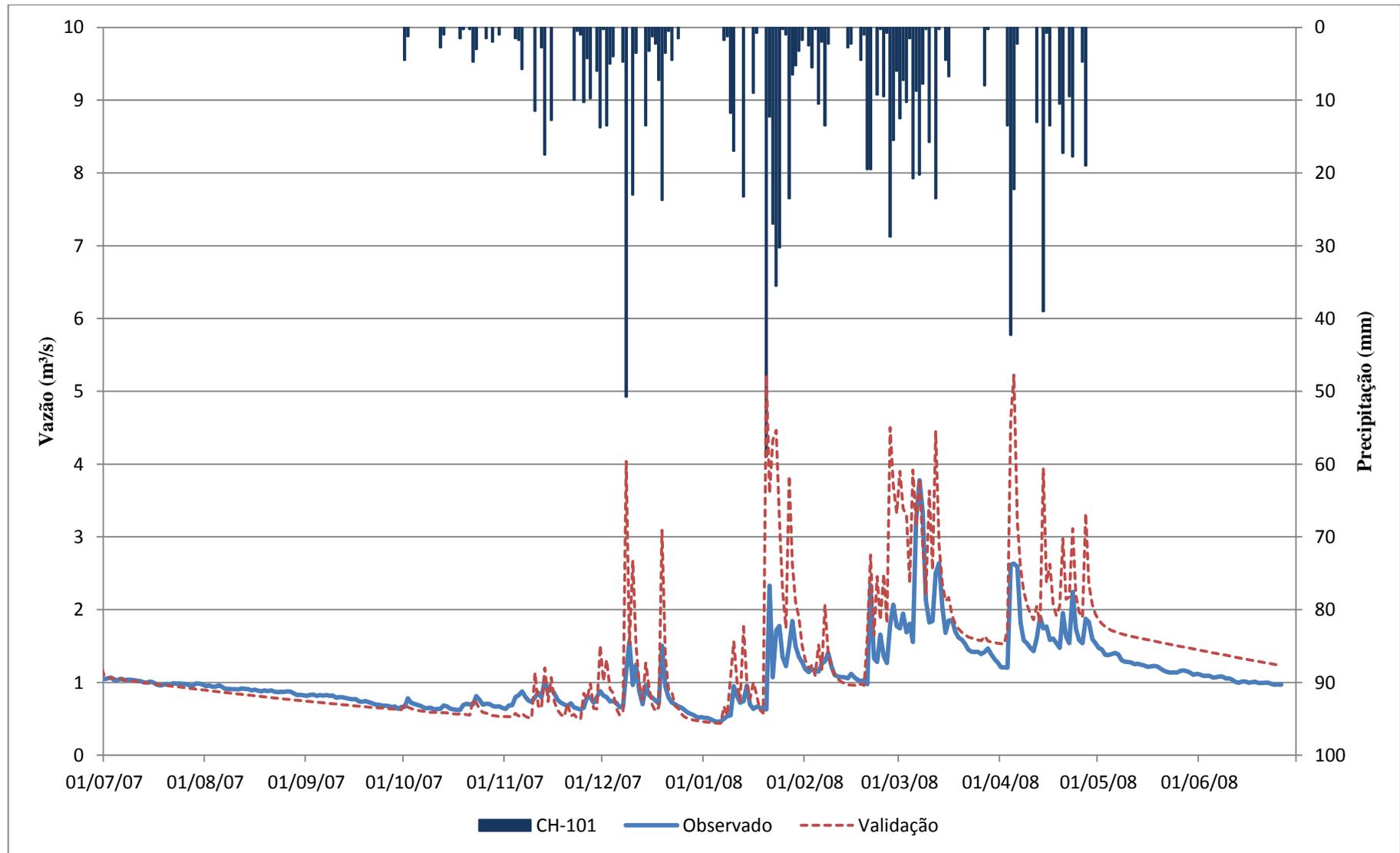


Figura 37: Gráfico da vazão observada (Lima, 2010) e simulada no período de 2007 a 2008, intervalo de validação do modelo (dados validados).

Na Figura 38 é apresentado o gráfico de dispersão para o ano 2007/2008 antes de aplicada a calibração dos dados e na Figura 39 mostra-se a dispersão para o período de validação pós-calibração. É notável a melhoria da distribuição dos dados pós calibração, diminuiu-se os picos de vazão de forma considerável, apesar de ainda haver superestimativa, também percebe-se uma disposição dos dados em relação a reta de tendência bem mais coerente.

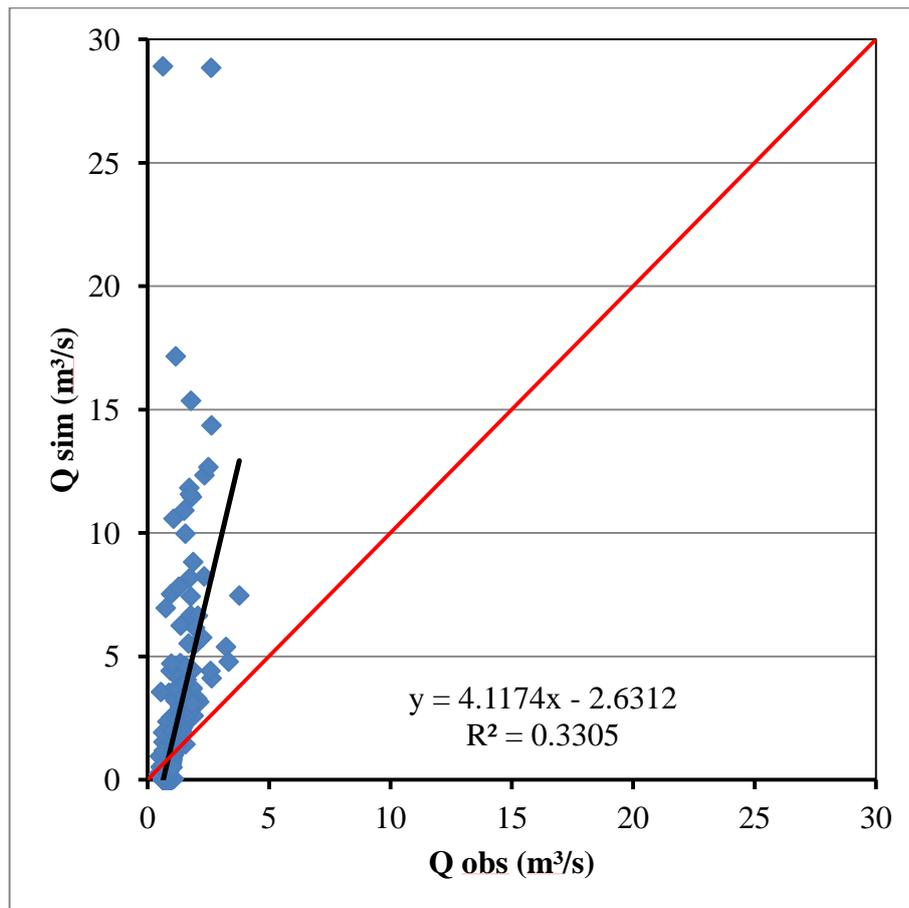


Figura 38: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 2007 a 2008.

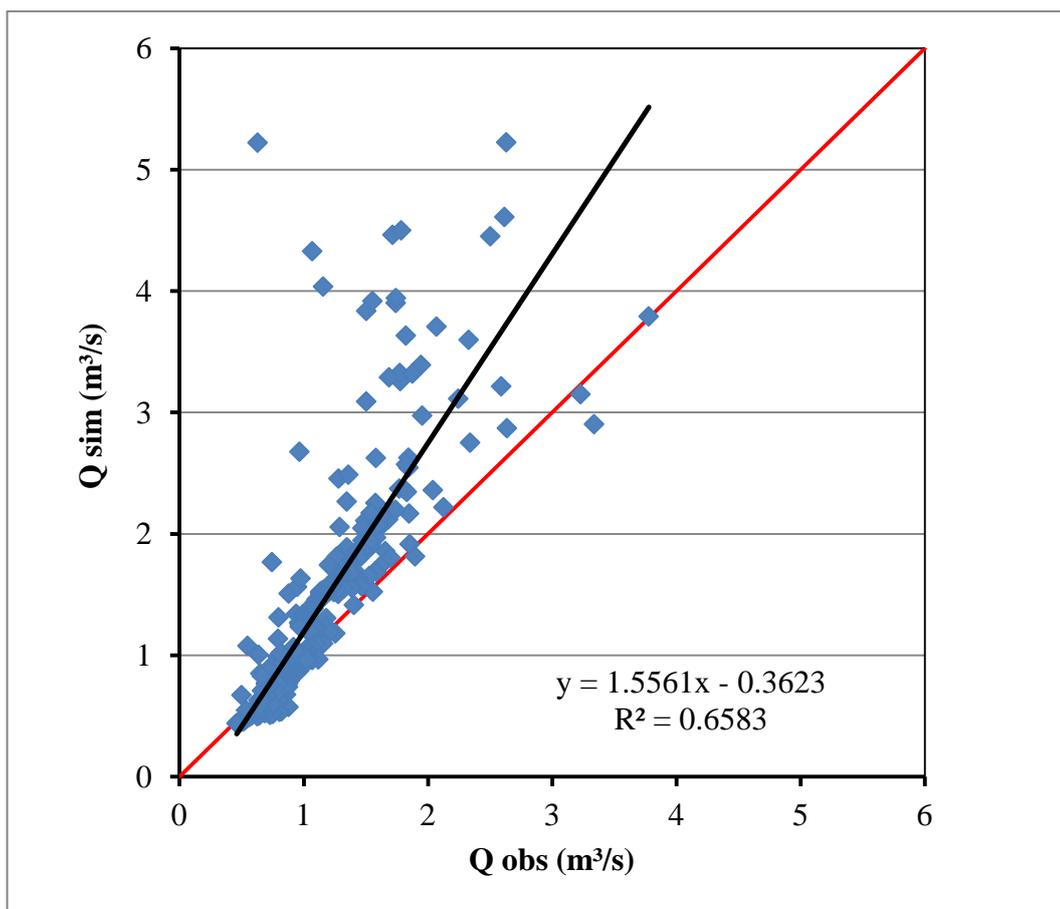


Figura 39: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 2007 a 2008 após a calibração.

Como o resultado para a validação obteve um ENS negativo e é perceptível por meio da figura 39 identificar períodos em que o ajuste dos dados simulados aos observados apresenta uma boa aderência, a série de dados foi seccionada em períodos menores, de maneira aleatória, e se verificou o índice de eficiência de três períodos distintos para avaliar a validação por eventos. Foram selecionados os períodos 01/07/07 a 30/10/07 (Figura 40), evento 1, período que se inicia no período de estiagem e se prolonga até as primeiras chuvas, 01/02/08 a 22/02/08 (figura 41) e 06/03/08 a 03/04/08 (figura 42), respectivamente eventos 2 e 3, ambos períodos onde a precipitação é constante.

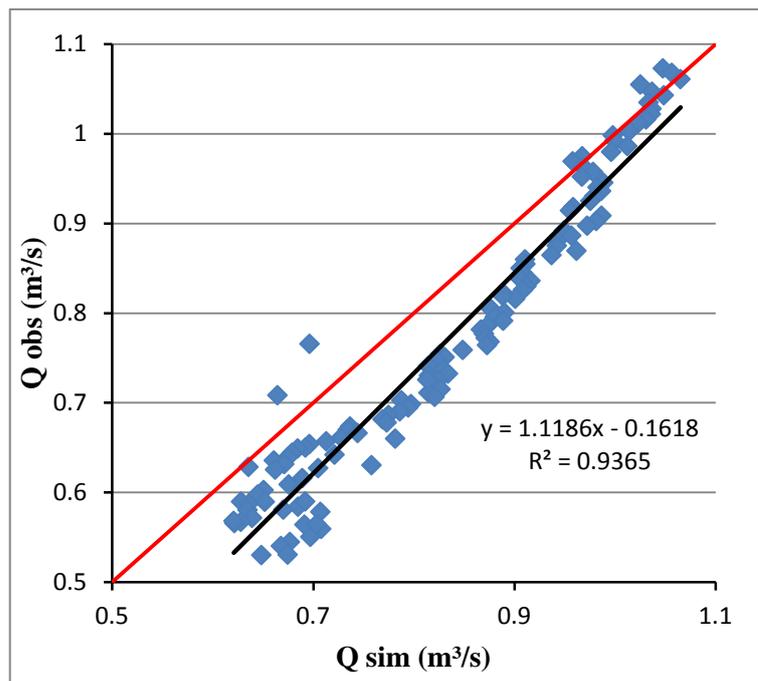


Figura 40: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 01/07/07 a 30/10/07 (Evento 1) após a calibração.

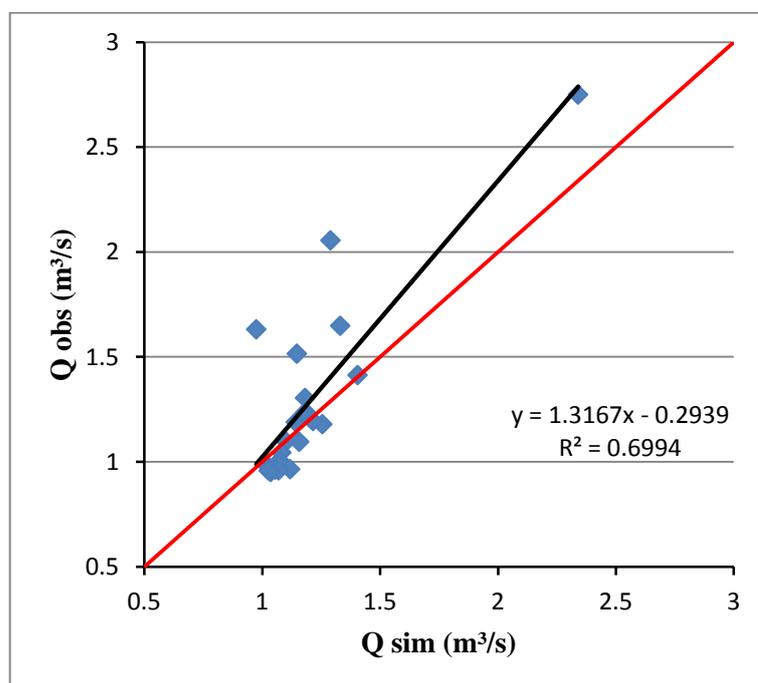


Figura 41: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 01/02/08 a 22/02/08 (Evento 2) após a calibração.

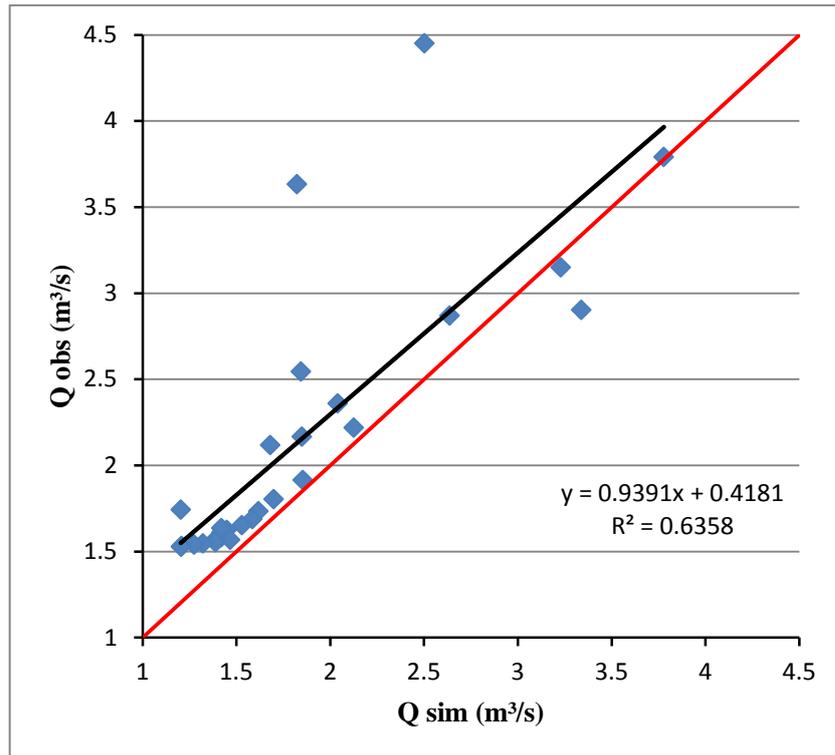


Figura 42: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 06/03/08 a 03/04/08 (Evento 3) após a calibração.

Para todos os eventos analisados os valores para o ENS foram positivos, os valores foram de 0,68, 0,64 e 0,27 respectivamente para os eventos 1, 2 e 3. Considerando-se o trabalho de Green e Griesven (2008) os eventos 1 e 2 podem ser considerados como satisfatórios para a calibração com dados diários, apenas o evento 3 não é considerado satisfatório. O melhor índice ENS e  $R^2$  foram encontrados para o primeiro evento, para o período de seca, indicando uma boa representatividade para o fluxo de base.

Esses resultados por evento apontam que o modelo foi capaz de simular com certa eficiência parte dos eventos de precipitação que ocorreram, mesmo que superestimando e ou subestimando alguns períodos da série no período de validação.

Nas Figuras 43 e 44 apresenta-se o comportamento dos resíduos dos dados (simulados - observados), para o período de calibração e validação respectivamente. É possível perceber claramente que para o período de calibração ocorreram tanto dados que foram superestimados e subestimados com uma intensidade semelhante, causando uma dispersão dos resíduos principalmente para o período chuvoso. Já no período da validação não se identifica uma tendência a subestimação dos dados com altos valores, apenas a superestimativa e grande dispersão dos resíduos da simulação também para o período chuvoso.

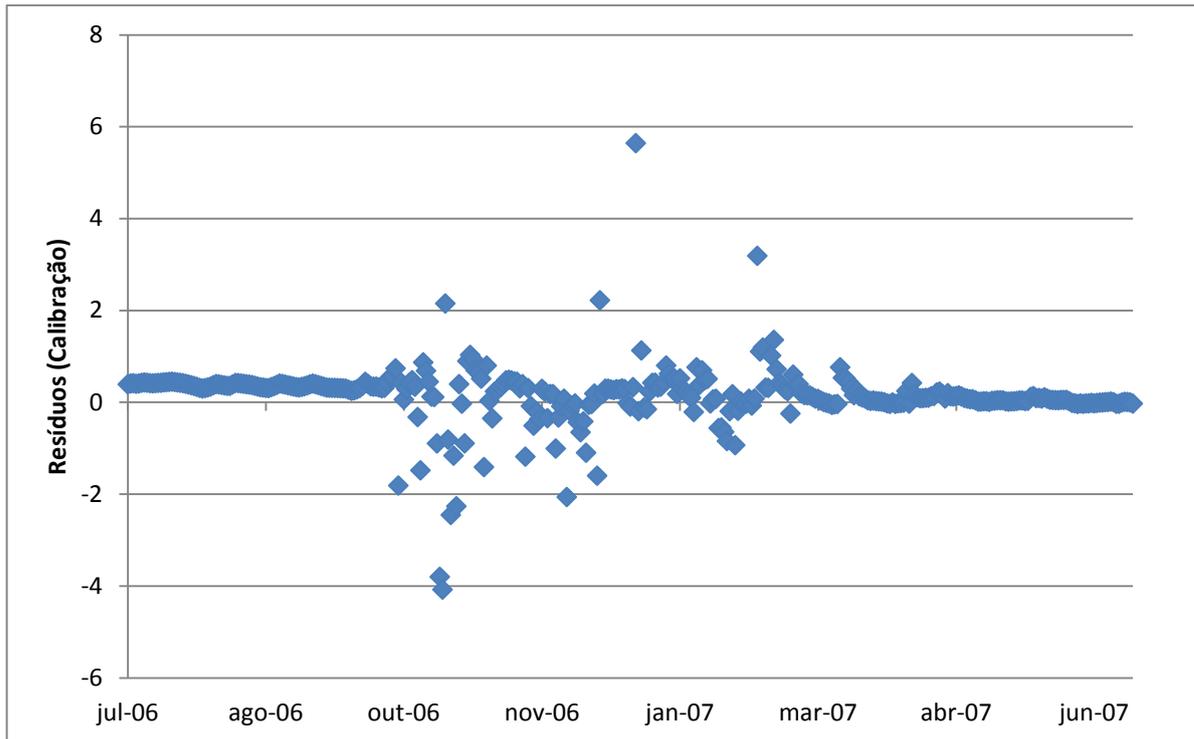


Figura 43: Gráfico de dispersão dos resíduos dos dados no período de 2006 a 2007 (dados calibrados).

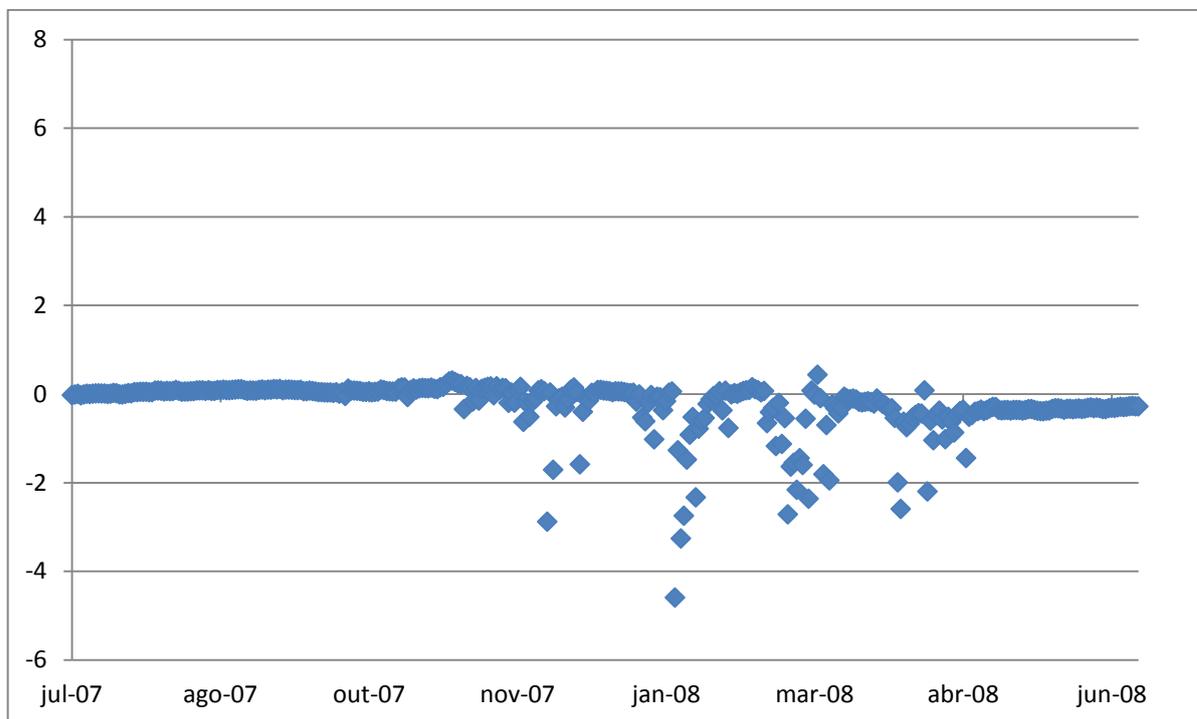


Figura 44: Gráfico de dispersão dos resíduos dos dados no período de 2007 a 2008 (dados validados).

Garrido (2003) aplicou o modelo SWAT para a bacia do Rio Jequiçá, na Bahia, embora não tenha conseguido valores satisfatórios para a calibração e validação, foi

observado em seu estudo que o período de validação apresentou resultados inferiores aos encontrados na calibração. Durães (2010) encontrou valores satisfatórios para a estimativa de vazão, através da comparação das vazões observadas e simuladas, para o período de calibração, e para o período de validação considerou que os valores obtidos para a simulação não foram satisfatórios.

Na tabela abaixo (Tabela 15) são apresentados valores de ENS para os períodos de calibração e validação de trabalhos que utilizaram o modelo SWAT no DF, para a estimativa do fluxo de água.

Tabela 11: Valores de ENS para o período de calibração e validação com o SWAT em bacias do Distrito Federal.

<b>Trabalho</b>	<b>Bacia</b>	<b>Calibração</b>	<b>Validação</b>	<b>Dados</b>
Sarmiento (2010)	Descoberto	0,62	0,34	Diários
		0,79	0,73	
Strauch <i>et al.</i> (2011)	Pipiripau	0,83	0,76	Diários
		0,81	0,69	
		0,74	0,43	
Ferrigo <i>et al.</i> (2012)	Descoberto	0,69	0,84	Mensal
		-	0,55	
		-	0,81	
Salles (2012)	Pipiripau	0,67	0,79	Mensal
Este trabalho	Alto Jardim	0,60	-0,84	Diários

Sarmiento (2010) utilizou o modelo para análise de incerteza e avaliação dos fatores que causam influência no modelo. Obteve-se um resultado satisfatório para o período de calibração mas o mesmo não ocorreu para a validação, usando dados diários.

Strauch *et al.* (2011) aplicaram o modelo, com diferentes tipos de dados de entrada para a precipitação, o primeiro de uma estação dentro da bacia, o segundo obtido através da aplicação de média móvel do primeiro dado, o terceiro inserindo estações localizadas fora da bacia e o último utilizando imagens do sensor TRMM, visando contornar o problema do uso de uma só estação, considerando a grande sazonalidade da área. Eles utilizaram a simulação com dados diários e obteve resultados satisfatórios tanto para o período de calibração como de validação para todas as saídas obtidas dos diferentes tipos de entrada.

Ferigo *et al.* (2012) utilizaram o SWAT para a estimativa do fluxo de água e sedimentos em uma sub-bacia do rio Descoberto, e realizaram calibração para o período de 2000 a 2005, e para a validação foram utilizados três períodos, 2006-2007, 2007-2008 e 2008-2009 . Salles (2012) realizou a calibração e validação do modelo para a predição das vazões do ribeirão Pipuripau. Ambos utilizaram dados mensais para as estimativas e obtiveram resultados satisfatórios para a calibração e validação.

O balanço hídrico da bacia para o período de validação estimou que cerca de 620 mm do total precipitado constitui a evapotranspiração, 36,63 mm o escoamento superficial, 117,34 mm o fluxo lateral, 268,9 mm a percolação, 262,62 mm o fluxo de base, 7,65 mm o ascensão capilar do aquífero raso, e 5,38 mm vão para a recarga do aquífero profundo (Figura 45).

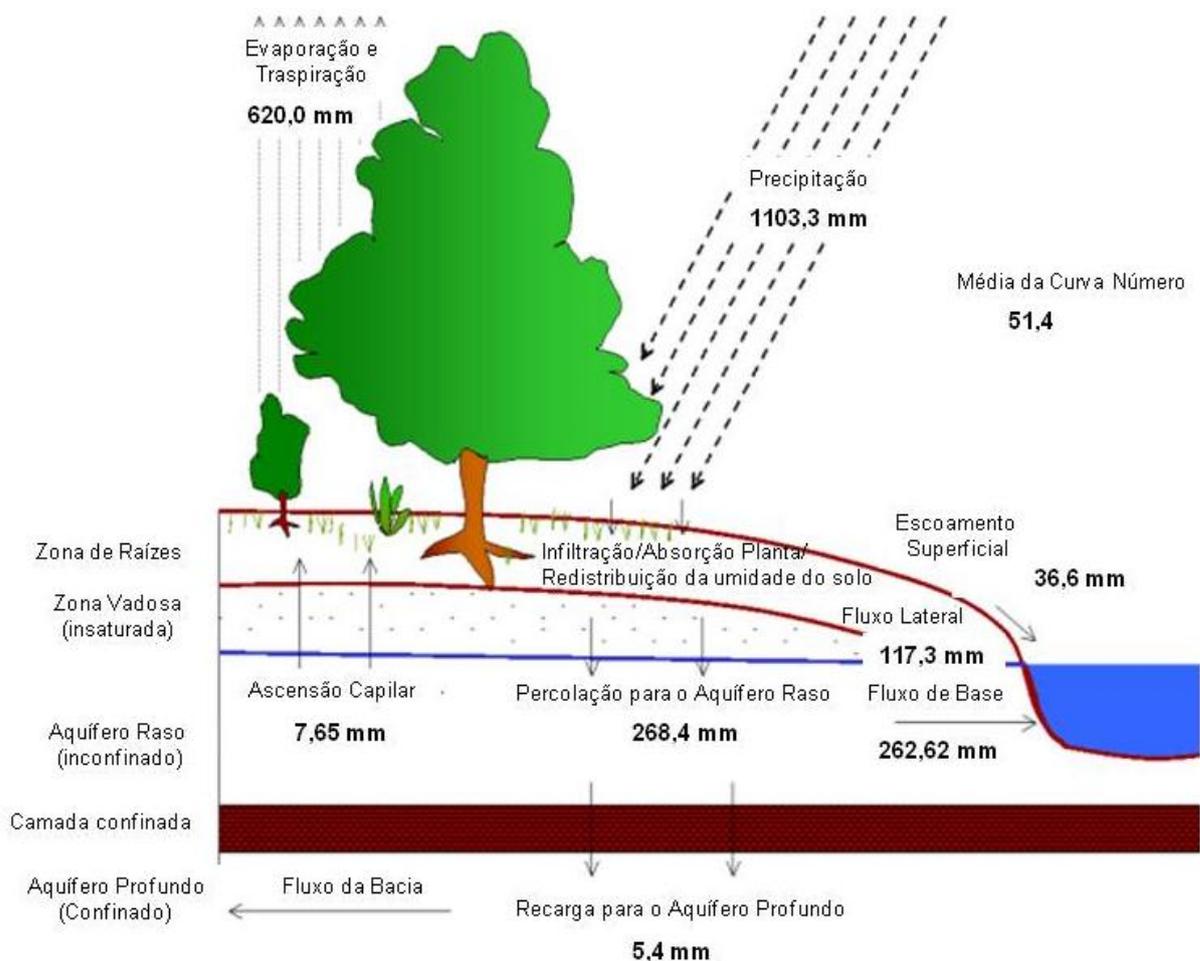


Figura 45: Balanço hídrico simulado pelo SWAT para o período de 2007 a 2008 após o período de calibração/validação.

Aplicando-se o valor dos parâmetros alterados para a série histórica completa obteve-se um ENS de 0,51 e um R<sup>2</sup> de 0,60. Os valores obtidos para o balanço hídrico para esse par

de anos correspondem a aproximadamente, 598,05 mm do total precipitado foi revertido em evapotranspiração, 47,59 mm em escoamento superficial, 125,74 mm em fluxo lateral, 315,22 em percolação, 308,55 em fluxo de base, 9,02 em ascensão capilar do aquífero raso, e 6,31 para a recarga do aquífero profundo.

A dispersão entre os dados observados e simulados para o período completo apresentou uma melhora significativa para os altos valores encontrados para os picos na primeira simulação, embora ainda tenha mantido a tendência de superestimativa dos mesmos, também apresentou uma melhora no ajuste da distribuição dos pontos em relação a reta de tendência (Figura 46).

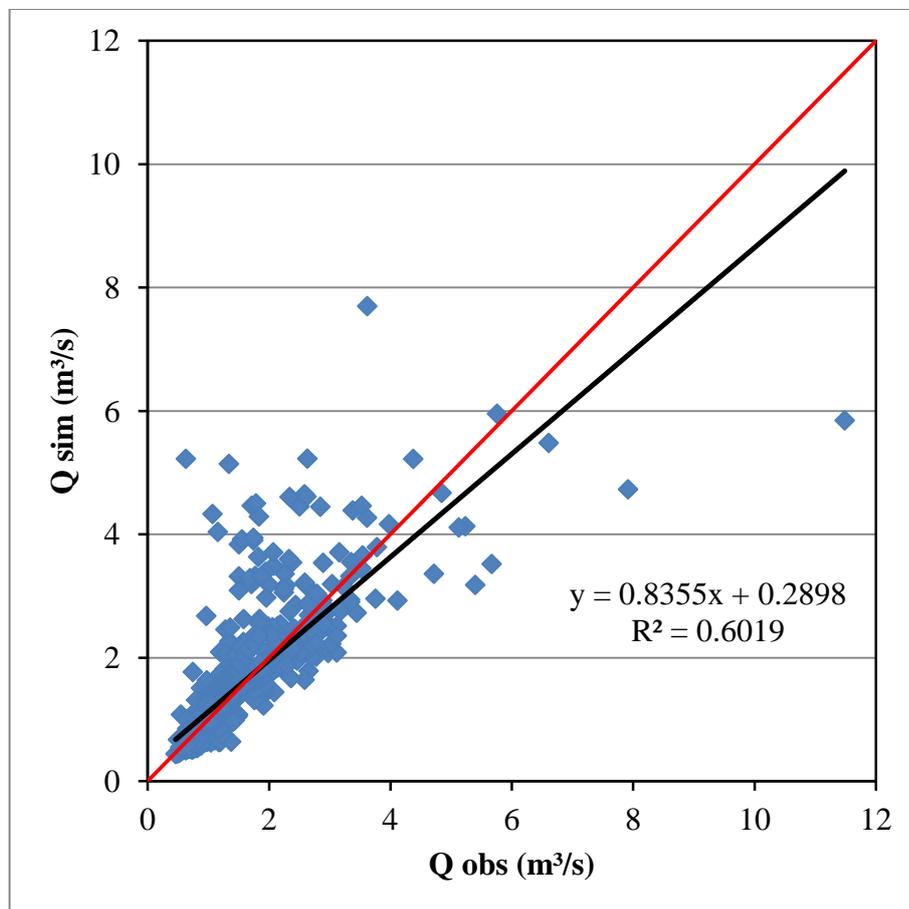


Figura 46: Gráfico de dispersão dos dados observados e simulados no período de 2006 a 2008 (dados calibrados e validados).

De acordo com Lima (2010) cerca de 1% a 3% do total precipitado é convertido em escoamento superficial, aproximadamente 25% a 27% resulta no fluxo de base e por volta de 70% do volume precipitado vai para a evapotranspiração. Ele obteve para a mesma bacia em estudo, no período de um ano (2007/2008) valores de referência para o balanço hídrico

(Tabela 10). Comparando os dados de Lima (2010) com os valores simulados pela modelagem com o SWAT para o ano 2006/2007, que apresentou um índice de eficiência satisfatório, tem-se que a evapotranspiração encontra seu valor 14% abaixo (56%), o escoamento superficial simulado foi superior 11% (14%), o fluxo de base possuiu um valor 1% inferior (24%) e o escoamento total se apresenta 8% acima (38%), o montante faltante é considerado como perdas por transmissão na modelagem. Lembrando que o escoamento superficial é a soma deste com o fluxo lateral, e uma vez que o fluxo lateral é diminuído para valores mais baixos, ocorre a eliminação dos picos da vazão. O balanço hídrico médio anual da bacia do rio Jardim aponta que o SWAT representa de forma satisfatória o fluxo de base, porém tende a subestimar a evapotranspiração e superestimar o escoamento superficial.

Em relação ao valor do CN, o valor médio para a bacia após a calibração e validação foi de 51,4. Menezes (2009) avaliou o efeito das ações antrópicas no processo de escoamento superficial na bacia do Lago Paranoá, e para essa estimativa ele utilizou o método CN, para o ano de 2009 ele obteve valores de CN ponderado, variando entre 44 e 72 para as unidades hidrológicas estudadas dentro da bacia, onde os menores valores de CN se aplicam para uma área com vegetação nativa preservada, enquanto os valores mais altos são para unidades com intensa urbanização. Salles (2012) aplicando o modelo SWAT, encontrou um CN médio anual para a bacia do ribeirão Pípiripau de 62,65. Sarmiento (2010) apresenta valores de CN após a calibração variando entre 25 e 84, para HRU. Os trabalhos de Strauch *et al.* (2011) e Ferrigo *et al.* (2012) não apresentam os valores de CN.

A modelagem com o uso do SWAT é complexa e necessita de uma série de dados, que muitas vezes não são disponíveis para a realidade da maioria das bacias brasileiras, o uso de dados de referência são alternativas para a aplicação do modelo, ao passo que essas incertezas são atribuídas as saídas do modelo. No caso deste estudo a maioria dos dados utilizados foram obtidos de aferições em campo, porém os dados exigidos relacionados ao uso foram aproximações realizadas dos dados disponíveis na própria base de dados do SWAT. Esses dados influenciam diretamente nos cálculos para a evapotranspiração e também para o CN, que pode ter sido um dos fatores para o resultado da simulação não ter sido satisfatório mesmo depois da calibração.

Um dos fatores que influenciam a diferença entre os resultados obtidos no período de calibração e validação é o curto período das séries temporais, principalmente para o período de calibração, de forma que o ano utilizado nesse período pode não ser significativo para representar as condições hidrológicas da bacia, primordialmente em relação ao ano de

validação do modelo. Na Tabela 12 apresenta-se uma estatística descritiva entre os dados de vazão observados e simulados na bacia, para o período de calibração e validação.

Tabela 12: Estatística descritiva dos dados de vazão observados e simulados.

Estatística	Calibração		Validação	
	Observado	Simulado	Observado	Simulado
Média	1.96	1.78	1.08	1.32
Erro padrão	0.06	0.05	0.02	0.05
Mediana	1.80	1.60	0.98	1.01
Modo	1.44	1.47	-	1.02
Desvio padrão	1.05	1.03	0.46	0.89
Variância da amostra	1.10	1.07	0.21	0.78
Curtose	22.72	4.49	6.02	3.87
Assimetria	3.54	1.71	1.96	1.89
Intervalo	10.57	7.07	3.32	4.79
Mínimo	0.92	0.62	0.46	0.44
Máximo	11.49	7.70	3.79	5.23
Soma	715.05	656.09	396.64	484.62
Contagem	365	365	366	366
Nível de confiança (95.0%)	0.11	0.11	0.05	0.09

De acordo com a tabela, nota-se que a vazão observada no período de calibração é superior a vazão observada para a validação, isso se dá tanto para o período seco quanto para o período chuvoso, é possível perceber também que a vazão observada para a calibração apresenta valores mais altos também para as medidas de dispersão. É possível perceber também que tanto no período de calibração quanto de validação a vazão simulada acompanhou a tendência da vazão observada. Isso reafirma a necessidade de um período maior para a calibração dos dados.

Ressaltando-se que foram desconsiderados da modelagem os reservatórios e a demanda hídrica associada à irrigação, deve-se lembrar que mesmo se tratando de barramentos pequenos dentro da bacia, a não consideração dos mesmos bem como da água destinada a irrigação, geralmente implementada nos períodos de seca, e em áreas pequenas, o que pode agregar erros para as repostas da modelagem. Lima (2010) aponta que o impacto da irrigação para o balanço hídrico, no ano hidrológico 2007/2008 foi muito pequeno, cerca de

0,75% de decréscimo na evapotranspiração e 0,75% de acréscimo para o escoamento de base em termos anuais, se tornando significativa nos períodos de estiagem. No caso, a parcela de água destinada a irrigação representou cerca de 20% da vazão mínima vertida no exutório.

Outro fato importante, é que o modelo só considera a profundidade dos solos até 350 cm, considerando que os solos brasileiros são solos profundos, esse pode ser outro fator que contribui para embutir erros no comportamento hídrico da rotina de água no solo, e conseqüentemente nas respostas de saída do modelo. Lima (2010) monitorou a variação da profundidade do nível do lençol freático em poços piezométricos dentro da bacia e identificou que o nível do lençol freático na bacia alcança, em alguns pontos, cerca de 20 metros de profundidade.

É importante ressaltar que a calibração foi realizada com poucos anos de dados, ao passo diário e de forma manual, podendo a calibração de forma automática fornecer índices de eficiência diferenciados. Ferrigo *et al.* (2012) por exemplo, realizaram a calibração manual e a calibração automática para a simulação da vazão em uma bacia do Distrito Federal, tendo a calibração manual apontado um ENS de 0.53 e a calibração automática um NS de 0.69, demonstrando resultados mais satisfatórios com a realização da calibração automática.

Outra medida a ser tomada para tentar melhorar a eficiência das simulações é realizar a calibração por sub-bacia, uma vez que existem estações fluviográficas, com dados de vazão diários.

## 5. CONCLUSÃO

Considerando os objetivos expostos no início do trabalho, foi possível concluir que:

- A análise de sensibilidade permitiu a identificação dos parâmetros mais significativos para a simulação da vazão com o modelo SWAT, e indicou que os parâmetros mais sensíveis na modelagem na bacia do alto rio Jardim são similares aos encontrados em outros estudos realizados em bacias na região Centro-Oeste;
- Os parâmetros mais sensíveis foram: Surlag, Alpha-BF, CN2, GWQMN, Sol-K, CH-K2, Slope, Slubbsn, Blai e Sol-Alb;
- A simulação hidrológica por meio do modelo SWAT não conseguiu representar a realidade de forma satisfatória sem a calibração dos parâmetros mais sensíveis no modelo;
- O período de calibração do modelo resultou em um ENS de 0,60 e um  $R^2$  de 0,66, valores considerados satisfatórios para a calibração diária;
- Não foi possível ajustar de forma satisfatória o modelo no período de validação, resultando em  $R^2$  de 0,66 e um ENS negativo;
- Mesmo superestimando os resultados das vazões, a modelagem mostrou boa representatividade para o fluxo de base para o período de junho de 2007 a janeiro de 2008, e conseguiu, mesmo que superestimando a vazão, seguir a tendência da vazão observada;
- Percebeu-se que a vazão observada para o período de calibração é bem superior a do período destinado a validação, dessa forma pode-se entender que o período da calibração não é representativo para as características climáticas da bacia, principalmente para o ano da validação;
- O modelo SWAT foi capaz de representar de forma satisfatória o fluxo de base médio anual para a bacia, no entanto se verificou uma tendência de subestimativa da evapotranspiração e superestimativa do escoamento superficial, tanto no período de calibração quanto na validação;
- As diferenças encontradas para o balanço hídrico podem estar relacionadas a deficiência nos dados de entrada para as características de uso e cobertura do solo, visto que elas impactam de forma direta para os cálculos de evapotranspiração e do método CN;

- O fato do modelo só considerar a profundidade dos solos até 350 cm pode ser o fator que influencia os resultados do balanço hídrico, de modo que uma vez que a água não tem como infiltrar ela acaba sendo revertida em escoamento superficial
- Pode-se considerar que o modelo possui aplicabilidade para a área, se consideradas as limitações dos dados e processos, bem como os objetivos das simulações, destacando-se que a modelagem é uma ferramenta de apoio a tomada de decisão e não uma solução direta para a gestão, de forma que os resultados obtidos não podem ser considerados como a verdade de campo e os dados aferidos em campo não podem ser substituídos.

- 

#### 5.1 Recomendações para estudos futuros:

- Inserir os reservatórios existentes na simulação;
- Incluir as práticas de irrigação na modelagem;
- Realizar a calibração do modelo por sub-bacia;
- Realizar a calibração automática;
- Implementar a análise de incerteza.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, K.C. 2011. SWAT-CUP2: 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, 95 p.
- ADRIOLO, M. V., SANTOS, I., GIBERTONI, R. C., CAMARGO, A. S. G. 2008. Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. In: VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Belo Horizonte – Minas Gerais. Brasil.
- ALBUQUERQUE, R. G. de. Recursos hídricos no Distrito Federal. 1999. Estudo nº 003/99. ASSEL/UDA. Câmara Legislativa do Distrito Federal. Brasília-DF, abril/1999; 30 p.
- ALVES SOBRINHO, T. ; OLIVEIRA, P. T. S. ; RODRIGUES, D. B. B. ; AYRES, F. M. 2010. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. Engenharia Agrícola (Impresso), v. 30. 46-57.
- ANA - Agência Nacional das Águas. 2005. Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil. Caderno de recursos hídricos. ANA-CDOC. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VF%20DisponibilidadeDemanda.pdf>. Acessado em setembro de 2012.
- ANDRADE, M. A. ; MELLO, C.R. ; BESKOW, S. 2013. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online), v. 17. 69-76.
- ARAÚJO, S. F. 2006. Hidroquímica dos aquíferos freáticos da bacia do Rio Jardim-DF. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 74p.
- ARNOLD, J. G.; MUTTIAH, R. S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P. M. 2000. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. Journal of Hydrology, v. 227, n. 1-4. 21-40.
- AZEVEDO, L. G. T. De. PORTO, R. L. L. ZAHED FILHO, K. 1997. Modelos de Simulação e de Rede de Fluxo. Capítulo 4. In: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Porto Alegre Ed. Universidade/UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- BALDISSERA, G. C. 2005. Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física e Meio Ambiente, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá. 148p.
- BALTOKOSKI, V. 2008. Modelo SWAT2005 aplicado às sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco/PR. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel. 115p.
- BALTOKOSKI, V., TAVARES, M. H. F., MACHADO, R. E., OLIVEIRA, M. P. 2010. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). Revista Brasileira de Ciência do Solo. 34: 253-261.

- BEKIARIS I.G., PANAGOPOULOS I.N. , MIMIKOU M. 2005. Application of the SWAT (Soil and water assessment tool) model in the Ronnea catchment of Sweden. *Global NEST International Journal*. 7(3), 313 - 322, November. ISSN 1790-7632.
- BETRIE, G. D., Y. A. MOHAMED, A. VAN GRIENSVEN, AND R. SRINIVASAN. 2011. Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model: *Hydrology and Earth System Sciences*. v. 15, 807-818.
- BEVEN, K.J., 1985, Distributed modelling, in M.G. Anderson and T.P. Burt (Eds), *Hydrological Forecasting*, Wiley, Chichester, UK. 405-435.
- BEVEN, K. J. 1989. Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*. 105. 157-172.
- BLAINSKI, E., GARBOSSA, L. H. P. 2009. Estimativa do regime hidrológico em uma bacia hidrográfica com base na modelagem hidrológica dinâmica e distribuída. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande – Mato Grosso do Sul. Brasil.
- BLAINSKI, E., GARBOSSA, L. H. P., MALUTA, S. 2010. Aplicação do modelo hidrológico SWAT (Soil Water Assessment Tool) para a simulação da perda de solo e da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica não instrumentada. In: X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Fortaleza – Ceará. Brasil.
- BLAINSKI, E.; ARAUJO, I.; GOMES, P. 2011. Modelagem e simulação do uso do solo e as alterações no ambiente. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2011, Uberlândia. XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo.
- BONUMÁ, N. B., REICHERT, J. M., MINELLA, J. P., BARROS, C. A. P., RODRIGUES, M. F., BUARQUE, D. C. 2010. Balanço hídrico e sua relação com a modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. In: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Brasília, Distrito Federal. Brasil.
- BRACMORT, K. S., M. ARABI, J. R. FRANKENBERGER, B. A. ENGEL, AND J. G. ARNOLD. 2006. Modeling longterm water quality impact of structural BMPs. *Trans. ASABE* 49(2): 367-374.
- BRAVO, J. M. ; ALLASIA, Daniel ; COLLISCHONN, Walter ; TASSI, R. ; MELLER, A. ; TUCCI, Carlos . 2007. Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v. 1.
- CALIJURI, M. L.; MEIRA, A. D.; PRUSK, F. F. 1998. Geoprocessamento aplicado aos recursos hídricos. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Poços de Caldas, MG. Cartografia, Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento. Lavras: UFLA, SBEA. 200-225.

- CAMPOS, J. E. G.; FREITAS-SILVA, F. H. 1998. Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Brasília, IEMA / SEMATEC / UnB, vol. IV. Relatório Técnico. p. 1-87.
- CARVALHO, F. 2010. Utilização do modelo SWAT para estimativa da produção de sedimentos em uma sub-bacia hidrográfica contribuinte ao lago do Descoberto-DF. Monografia de conclusão de curso de especialização, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 60p.
- CARVALHO NETO, J. G. de. 2011. Simulação hidrossedimentalógica da Bacia do Riacho dos Namorados com o modelo SWAT. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande-PB. 201p.
- CARVALHO NETO, J. G. ; SRINIVASAN, V. S. ; RUFINO, I. A. A. . 2011. Simulação hidrossedimentológica, analisando dois mdes, de duas pequenas sub-bacias no cariri paraibano utilizando o modelo swat. Revista Geográfica Acadêmica, v. 5, p. 48-58.
- CECH, T. 2009. Principles of Water Resources: History, Development, Management, and Policy. 3ed. Wiley & Sons. Inc. 546 pp.
- CHAVES, T. A. 2011. Análise do custo econômico da erosão em uma bacia hidrográfica ocupada por agricultura: Um estudo de caso na bacia do Rio Jardim-DF. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geografia Geografia, Universidade de Brasília. 86p.
- 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.
- COLLISCHONN, W.; TASSI, R. Introduzindo Hidrologia. 2010. Porto Alegre: IPH/UFRGS. p 82.
- CONAN, C. F; BOURAOUI, N; TURPIN, G; DE MARSILY; G. BIDOGLIO. 2003. Modeling flow and nitrate fate at catchment scale in Brittany (France). J. Environ. Qual. 32(6): 2026-2032.
- CHRISTOFOLETTI, A. 1999. Modelagem de sistemas ambientais. São Paulo: Edgard Blücher. 236 pp.
- DEBELE B; SRINIVASAN R; PARLANGE Y. J. 2006. Coupling upland watershed and downstream waterbody hydrodynamic and water quality models (SWAT and CE-QUAL-W2) for better water resources management in complex river basins. Environ Model Assess 2006; DOI 10.1007/s10666-006-9075-1.
- DEVANTIER, B. A.; FELDMAN, A. D. 1993. Review of the GIS application in hydrologic modeling. Journal of Water Resources Planning and Management. v 19. 246-260.
- DHAR, S.; MAZUMDAR, A. 2009. Hydrological modelling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case of study in India. Hydrological Processes, vol 23, 2394 – 2406.
- DI LUZIO, M.; SRINIVASAN, R. & ARNOLD, J. 2001. ArcView interface for SWAT2000 - User's Guide. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. 395p.

- DOLABELLA, R.H.C. 1996. Caracterização geoambiental e avaliação da demanda e da disponibilidade dos recursos hídricos para agricultura irrigada na bacia hidrográfica do rio Jardim. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 109 p.
- DOOGE, J. C. I. 1973. Linear theory of hydrologic systems. Technical Bulletin n.1948. ARS, US Department of Agriculture. 327pp.
- DOOGE, J. C. I. 1986. Looking for hydrologic laws. *Water Resources Research*, 22(9). 46S-58S.
- DOWBOR, L. 2001. Política econômica e social: os desafios do Brasil. In: *A reprodução social*. Edição em três volumes. Disponível em: <http://raceadm3.nuca.ie.ufrj.br/buscarace/Docs/ldowbor13.pdf>. Acessado em outubro de 2012.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K.. 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*. 158. 265-284.
- DURÃES, M. F. 2010. Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do Rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído. Dissertação de Mestrado, Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 134p.
- ECOPLAN, 2012 - Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do DF - PGIRH. Ecoplan-ADASA. Edição em 3 volumes. Disponível em: [http://www.adasa.df.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=698:sirh-31-planos-de-recursos-hidricos-revisao-pgirh&catid=79](http://www.adasa.df.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=698:sirh-31-planos-de-recursos-hidricos-revisao-pgirh&catid=79). Acessado em outubro de 2012.
- EMBRAPA-EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA -. 2006. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro. 412p.
- FERNANDES, J. G.; GALVÍNCIO, J. D.; FREIRE, M. B. G. dos S. 2012. O Modelo SWAT e suas Possibilidades de Aplicações em APL Agrícolas. *Revista Brasileira de Geografia Física*. 115-126.
- FERRIGO, S. 2011. Utilização do modelo SWAT na estimativa de produção de sedimentos na bacia do córrego capão comprido no Distrito Federal. Trabalho de Conclusão do Curso, Instituto de Agronomia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 90 p.
- FERRIGO, S.; MINOTI, R.; Roig, H. L.; Koide, S. 2012. Análise do modelo SWAT na simulação de produção de sedimentos quando calibrado unicamente para vazão em uma pequena bacia hidrográfica rural. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Foz do Iguaçu - PR. 18 p.
- FROTA, P. V. 2006. Propostas para gestão integrada dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Jardim – DF. Dissertação de Mestrado, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília. 145 p.
- GARBOSSA, L. H. P.; BLAINSKI, E.; JUSTEN, J. G K.; VASCONCELOS, L. R. 2010. Potencial de uso de modelo hidrológico de base física na avaliação da legislação florestal e seus impactos nos cenários hidrológicos. In X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Fortaleza – Ceará. Brasil.

- GARBOSSA, L. H. P.; VASCONCELOS, L. R.; LAPA, K. R.; BLAINSKI, E.; PINHEIRO, A. 2011. The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010. International SWAT Conference & Workshops. Toledo - Spain. 22 p.
- GARRIDO, J. M. 2003. Aplicação de modelo matemático de simulação com utilização de SIG à bacia do rio Jiquiriçá – Bahia. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 198p.
- GASSMAN, P. W; JHA, M; SECCHI, S; ARNOLD, J. 2003. Initial calibration and validation of the swat model for the upper Mississippi river basin. Polution diffuse, Conference Dublin. Center of Agricultural and Rural Development. Iowa State University. 10B:10-40 Ames.
- GASSMAN, P. W; REYES, M. R; GREEN, C. H; ARNOLD, J. G. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Vol. 50(4): 1211-1250.
- GIBERTONI, R. F. C., SANTOS, I., MÜLLER, I. I., PEREIRA, P. S. 2009. Modelagem da produção e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas do litoral paranaense: o caso da bacia do rio Nhundiaquara. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande, Mato Grosso do Sul. Brasil.
- GODOY, M. J. S.; LOPES-ASSAD, M. L. 2002. Aptidão agrícola de terras com estimativa de risco climático para a cultura do milho utilizando geoprocessamento. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa-MG. vol. 26, núm. 3. 685-694.
- GONÇALVES, T. D. 2007. Geoprocessamento como ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2007. 88p.
- GOVENDER, M.; EVERSON, C. S. 2005. Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model. Hydrological Processes, v. 19. 683-692.
- GREEN, C. H.; GRIENSVEN, A. V. 2008. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. Environmental Modelling and Software, v. 23, n. 4. 422-434.
- GRIENSVEN, A. V.; MEIXNER, T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DILUZIO, M.; SRINIVASAN, R. 2006. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. Journal of Hydrology, v. 324. 10-23.
- GRIENSVEN, A. V. 2007. Sensitivity, auto-calibration, uncertainty and model evaluation in SWAT2005. Artigo Técnico. Disponível em: <http://groups.google.com/group/swatuser/files>. Acessado em outubro de 2011.
- IBGE. 1992. Manual técnico da vegetação brasileira. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro, RJ. 92p.

- IBGE. 2006. Manual técnico de uso da terra. Manuais Técnicos em Geociências Número 7. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, RJ . 2 ed. 64p.
- HERNANDEZ, M., MILLER S.,GOODRICH, D. 2002. Modeling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-arid watersheds. *Environmental Monitoring and Assessment*, 64 (2000). 285–298.
- HU, X; MCISAAC, G. F; DAVID, M. B; LOUWERS, C. A. L. 2007. Modeling riverine nitrate export from an East-Central Illinois watershed using SWAT, *J. Environ. Qual.*, 36, 996–1005.
- LELIS, T. A; CALIJURI, M. L. 2010. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. *Revista Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. 5(2): 158-174.
- LELIS, T. A. ; CALIJURI, M. L. ; SANTIAGO, A. da F. ; LIMA, D. C. de ; ROCHA, E. de O. 2012. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso)*. v. 36. 623-634.
- LENHART, T.; ECKHARDT, K.; FOHRER, N.; FREDE, H. G. 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 27, n. 9-10. 645-654.
- LIMA, J. D. C. V. Análise da ferramenta arcCN runoff na simulação de infiltração e escoamento superficial de água na microbacia hidrográfica do rio capetinga Distrito Federal. 2009. Monografia de Especialização, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília. 50p.
- LIMA, J. E. F. W. ; FERREIRA, R. S. A. ; CHRISTOFIDIS, D. 1999. O uso da irrigação no Brasil. In: Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas; ANEEL; OMM; SRH/MMA. (Org.). *O Estado das Águas no Brasil - 1999: Perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos*. 1 ed. v. p. 73-82.
- LIMA, J. E. F. W. ; SETTI, A. A. ; CHAVES, A. ; PEREIRA, I. C. 2001. Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL : Agência Nacional de Águas - ANA. 3 ed. v. 6000. 328 p.
- LIMA, J. E. F. W. 2010. Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no Cerrado. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 312p.
- LINO, J. F. L., CORSEUIL, C. W., KOBIYAMA, M., MALUTTA, S., UDA, K., BORTOLOTTI, N. L., SANTOS, I. 2009. Análise da vazão da bacia hidrográfica do rio Preto com o modelo SWAT. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande, Mato Grosso do Sul. Brasil.
- LOPES, N. H. Y. 2008. Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais utilizando o modelo SWAT. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 164p.
- LOPES, N. H. Y., KOBIYAMA, M. 2008. Análise do equilíbrio hidrossedimentológico em uma microbacia experimental com o modelo SWAT e as características geomorfológicas. In: VII

- Simpósio Nacional de Geomorfologia e II Encontro Latino-Americano de Geomorfologia. Belo Horizonte – Minas Gerais. Brasil.
- LOPES, N. H. Y. ; GODOY, F. B.; KOBİYAMA, M. 2008. Análise da produção de água e de sedimento em uma microbacia experimental com a aplicação do modelo SWAT. In: VI Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, Serra Negra.
- LUBITZ, E. 2009. Avaliação da aplicação do modelo hidrológico SWAT à Bacia do Ribeirão Concórdia – Lontras, SC. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Ambiental, Universidade Regional de Blumenau. 125p.
- MALUTTA, S. ; KOBİYAMA, M. ; CORSEUIL, C. W. 2009. Aplicação do modelo SWAT no gerenciamento de bacias hidrográficas: Bacias-escola na região norte catarinense.. In: Encontro Nacional dos Estudantes de Engenharia Ambiental, 2009, Viçosa. Encontro Nacional dos Estudantes de Engenharia Ambiental. v. 7.
- MALUTTA, S. 2012. Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do rio negrinho - SC com o modelo SWAT. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. 126p.
- MACHADO, R. E. 2002. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Piracicaba. Tese de Doutorado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 152p.
- MACHADO, R. E. ; VETTORAZZI, C. A. ; CRUCIANI, D. E. . 2003. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 8, n. 1. 147-155.
- MARCHIORO, E; FERNANDES, N. F; MACEDO, J. R. de; BHERING, S. B; GONÇALVES, A.O; CAIADO, M.A.C. 2011. Modelagem da produção de sedimentos no noroeste fluminense como subsídio ao planejamento ambiental: um estudo de caso da bacia do córrego Santa Maria. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 12. 29-38.
- MENDONÇA, A. S. F. 2009. Apostila de hidrologia. Universidade Federal do Espírito Santo. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAvToAC/apostila-hidrologia>. Acessado em dezembro de 2012.
- MENEZES, P. H. B. J. 2009. Avaliação do efeito das ações antrópicas no processo de escoamento superficial e assoreamento na bacia do lago Paranoá. 2009. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 117p.
- MENEZES, P. H. B. J., Roig, H.L., Almeida, T.; Soares Neto, G.B. Isaias, F.B. 2012. Análise da evolução do padrão de uso e ocupação do solo na bacia de contribuição do Lago Paranoá - DF Estudos Geográficos, Rio Claro, 8(1): 87-105, jan./jun., 2010 (ISSN 1678—698X). Disponível em: <http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/estgeo>. Acessado em janeiro de 2013.

- MERCURI, E. G. F., DEPPE, F., LOHMANN, M., SIMÕES, K. 2009. Metodologia da geração de dados de entrada e aplicação do modelo SWAT para bacias hidrográficas brasileiras. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal – Rio Grande do Norte. Brasil.
- MMA. 2005. Consumo sustentável: Manual de educação. Brasília: Consumers International/ MMA/ MEC/IDEC, 2005. 160p.
- 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 2007; 50(3): 885-900.
- MÜLLER, A. G.; SILVA, F. A. M.; FERREIRA, D. R.; BARBOSA, J. B. 2007. Boletim Agrometeorológico do ano de 2006 para a estação principal da Embrapa Cerrados em Planaltina-DF. Série Documentos. Documentos 204. Embrapa Cerrados, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Planaltina-DF. 44 p.
- NEITSCH, S. L; ARNOLD, J. G; KINIRY, J. R; SRINIVASAN, R; WILLIAMS, J. R. 2002. Soil and water assessment tool – Theoretical documentation:Version 2000. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. 506p.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. R.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J.J. 2005a. Soil and water assessment tool: theoretical documentation – version 2005. SERVICE., G-S. A. W. R. L. – A. R. Texas USA. 525p.
- NEITSCH, S. L; ARNOLD, J. G; WILLIAMS, J. R. 2005b. Soil and water assessment tool. Input/output file documentation: Version 2005. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, EUA. 530p.
- NEVES, F. F. 2005. Análise prospectiva das áreas de risco à erosão na microbacia hidrográfica do Rio Bonito (Descalvado – SP), potencialmente poluidoras por dejetos de granjas. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 153p.
- NEVES FF; SILVA, FGB; CRESTANA, S. 2006. Uso do modelo AVSWAT na avaliação do aporte de nitrogênio (N) e fósforo (P) aos mananciais de uma microbacia hidrográfica contendo atividade avícola. Engenharia Sanitária e Ambiental. vol.11 no.4. Rio de Janeiro Oct./Dec. 2006. 311-317.
- NRCS. 1997. Hydrology. National Engineering Handbooks. National Resources Conservation Service. USDA, Washington, USA. 762p.
- OLIVEIRA, C. 2000. Proposta para mobilização de comunidades. Semana interamericana da água. Guia prático. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsadiaa/p/material/guiamc.pdf>. Acessado em julho de 2012.
- OLIVERA, Francisco; VALENZUELA, M.; SRINIVASAN, R.; CHOI, J.; CHO, H., KOKA, S., AGRAWAL, A. 2006. ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS interface for SWAT. Journal of the American Water Resources Association. vol 42, nº2. 295-309.

- PAIM, J. B.; MENEZES, J. T. 2009. Estimativa do balanço sedimentar da bacia do rio Tijucas (SC-Brasil) a partir da aplicação do modelo hidrológico SWAT. *Revista Geográfica Acadêmica*. 3(2): 5-14.
- PAIVA, R. C. D., PAIVA, E. M. C. D. 2006. Simulação hidrológica com modelo SWAT na Bacia Menino Deus I, representativa da Mata Atlântica. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Curitiba, Paraná. Brasil.
- PEREIRA, J. M. G., CAMPANA, N. A., EID, N. J. 2005. Processamento de dados para utilização de modelo matemático de simulação à bacia do rio Jiquiriçá - Bahia. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. João Pessoa, Paraíba. Brasil.
- PERRY, J. & VANDERKLEIN, E. 1996. *Water Quality: Management of a Natural Resource*. ed. Cambridge. 607pp.
- PIKOUNIS M., VARANOU E., BALTAS E., DASSAKLIS A. AND MIMIKOU M. 2003. Application of the SWAT model in the Pinios river basin under different land use scenarios. *Global Nest: the International Journal*, 5(2), 71-79.
- PONCE, V. M.; HAWKING, R. H. 1996. Runoff curve-number: has it reached maturity?. *Journal of Hydrology Engineering*. v 1. n 1. 11-19.
- PRADO, THAIS B.G.P. 2005. Evolução do uso das terras e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Jundiá-Mirim. Dissertação de Mestrado, Instituto Agrônomo de Campinas. 63p.
- RADCLIFFE, D. E., Z. LIN, L. M. RISSE, J. J. ROMEIS, AND C. R. JACKSON. 2009. Modeling phosphorus in the Lake Allatoona watershed using SWAT: II. Effect of Land Use Change. *J. Environ. Qual.* 38(1): 111-120.
- REATTO, A.; CORREIA, J.R.; SPERA, S.T.; CHAGAS, C.S.; MARTINS, E.S.; ANDAHUR, J.P.; GODOY, M.J.S. & ASSAD, M.L.C.L. 2000. Levantamento semidetalhado dos solos da bacia do rio Jardim - DF, escala 1:50.000. Planaltina: Embrapa Cerrados. 63p.
- RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. 2000. 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.
- ROCHA, E. O.; CALIJURI. M. L.; CARVALHO, I. de C.; SILVA, M. D. F. M. e. 2010. Utilização do modelo SWAT no monitoramento de impactos ambientais decorrentes de alterações climáticas. XXIV Congresso Brasileiro de Cartografia. Aracaju - SE - Brasil. 1256-1264.
- SALLES, L. de A. 2012. Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pípiripau. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. 114 p.
- SALTELLI, A.; CHAN, K.; SCOTT, M. 2000. *Sensitivity Analysis*. New York, USA. Willey.

- SANO, E. E; ROSA, R; BRITO, J. L. S; FERREIRA, L. G. 2010. Mapeamento do uso do solo e cobertura vegetal bioma Cerrado ano base 2002. MMA, SBF. Serie Biodiversidade, 36. 96p.
- SANTHI, C; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 37, n. 5. 1169-1188.
- SANTHI, C., R. SRINIVASAN, J. G. ARNOLD, AND J. R. WILLIAMS. 2006. A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas. *Environ. Model. Soft.* 21(8): 1141-1157.
- SANTOS, I., ANDRIOLO, M. V., GIBERTONI, R. C., PEREIRA FILHO, D. L., NISHIDA, E., SILVA, R. C. 2006. Simulação com modelo SWAT das condições hidrológicas e de produção e transporte de sedimentos na bacia do rio Apucarantina – PR. In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia – Geomorfologia Tropical e Subtropical: processos, métodos e técnicas. Goiânia, Goiás. Brasil.
- SANTOS, R. C. 2002. Classificação textural aplicada à cobertura do solo de uma bacia hidrográfica usando sensoriamento remoto. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 153p.
- SARMENTO, L. 2010. Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas. Tese de Doutorado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. 241p.
- SARTORI, A. 2004. Avaliação da classificação hidrológica do solo para determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Civil, Universidade de Campinas. 159p.
- SCHUOL J, ABBASPOUR KC, YANG H, SRINIVASAN R, ZEHNDER AJB. 2008. Modelling blue and green water availability in Africa. *Water Resources Research* 44: W07406, p. 1.
- SETEGN, S.G., SRINIVASAN, R., DARGAHI, B. 2008. Hydrological Modeling in the Lake Tana Basin, Ethiopia using SWAT model. *The Open Hydrology Journal*. 2(2008): 49-6.
- SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. 2001. Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos. Agência Nacional da Água. Brasília. 225p.
- SETZER, J; PORTO, R. L. L. 1979. Tentativa de avaliação do escoamento superficial de acordo com o solo e seu recobrimento vegetal nas condições do Estado de São Paulo. São Paulo.
- SCHULTZ, G. B., SOUZA, R. M., SANTOS, I. 2010. Simulação da produção e transporte de sedimentos na bacia do Altíssimo rio Negro com o modelo SWAT. In: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Brasília – Distrito Federal. Brasil.
- SILVA, U. P. A. 2004. Análise da importância da gestão participativa dos recursos hídricos no ceará: um estudo de caso. Dissertação de Mestrado, Departamento de Economia Agrícola, Universidade Federal do Ceará. 246p.

- SILVEIRA, A.L.L. 2009. 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.
- SINGH, . P.1995. Computer models of watershed hydrology. Boulder, Water Resources Publications.
- SPERA, S. T.; REATTO, A; MARTINS, E. S.; SILVA, A. V.; FARIAS, M. R. 2002. Aptidão Agrícola das terras da bacia do Rio Jardim, DF. Planaltina-DF. Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Embrapa Cerrados. 38p.
- SOUZA, R. M.; SANTOS, I; KOBAYAMA, M. 2009. O modelo SWAT como ferramenta para gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais do Congresso.
- SRINIVASAN, R. X. ZHANG, AND J. ARNOLD. 2010. SWAT Ungauged: Hydrological budget and crop yield predictions in the Upper Mississippi River Basin. American Society of Agricultural and Biological Engineers 53:1533-1546.
- STRAUCH, M. ; BERNHOFER, C. ; KOIDE, S. ; VOLK, M. ; LORZ, C. ; MAKESCHIN, F. 2012. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. Journal of Hydrology. Amsterdam. v. 414-415. 413-424.
- TERRACAP, 2010. Mapeamento cartográfico do Distrito Federal. Disponível em: <http://www.sedhab.df.gov.br/desenvolvimento-urbano/gestao-da-informacao-urbanas/mapas.html>. Acessado em setembro de 2010.
- TUCCI, C.E.M. 1998. Modelos Hidrológicos. Porto alegre – RS. Ed. Universidade UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 652p.
- TUCCI, C. E. M. 2009. Hidrologia: Ciência e aplicação. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. Porto Alegre, RS. 4 ed. 1 reimp. 943p.
- UNESCO. Vegetação no Distrito Federal – Tempo e Espaço. 1ª Ed, Brasília – DF: 2000. 74p.
- UNESCO. Vegetação do Distrito Federal. Tempo e Espaço: Uma avaliação multitemporal da perda de cobertura vegetal no DF e da diversidade florística. 2. ed. Brasília - DF: 2002. 80p.
- USBR U.S. Bureau of Reclamation - United States Department of the interior. 1977. Design of Small Dams. Companhia Editorial S.A. México, D. F. 639p.
- UZEIKA, T. Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. 2009. Dissertação de Mestrado, Instituto de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 130p.
- UZEIKA, T.; MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P.G.; MORO, M. 2012. Use of the swat model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. Rev. Bras. Ciênc. Solo. vol.36, n.2 ISSN 0100-0683. 558-566.
- VISSMAN JR., W. & LEWIS, G. L. 1996. Introduction to hydrology. New York. Haper Collins College Publishers. 4 ed.

- WHITE, Kati L.; CHAUBEY, I. 2005. Sensitivity Analysis, Calibration and Validation for a Multisite and Multivariable SWAT Model. *Journal of the American Water Resources Association*. October. 1077– 1089.
- WINCHELL, M., SRINIVASAN, R., DI LUZIO, M., AND ARNOLD, J. G. 2010. ArcSWAT interface for SWAT2009 User's guide. USDA Agricultural Research Service and Texas A&M Blackland Research Center, Temple, Texas. 431p.
- ZEE. 2012a. Zoneamento Ecológico-Econômico do DF. Subproduto 3.2 – Relatório do Diagnóstico. Disponível em: <http://www.zee-df.com.br/Arquivos%20e%20mapas/Volume%20III-%20Uso%20do%20Solo,%20JuridicoInstitucional,%20Art.%20RIDE%20e%20Fundi%20C3%A1rio.pdf>. Acessado em janeiro de 2013.
- ZEE. 2012b. Zoneamento Ecológico-Econômico do DF. Subproduto 3.1 – Relatório do Meio Físico e Biótico. Disponível em: <http://www.zee-df.com.br/Arquivos%20e%20mapas/Volume%20II-%20Meio%20F%20C3%ADsico.pdf>. Acesso em janeiro de 2013
- ZHAN, X. & HUANG, M.L. 2004. ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. *Environmental Modelling & Software* 19 (10) 875-879.
- ZHAO, F., ZHANG, L., CHIEW, F., AND VAZE, J. 2011. The effect of spatial rainfall variability on streamflow predictions for Australian catchments. Chan, F., Marinova, D., and Andersson, R. (eds), MODSIM2011, 19th. In: *International Congress on Modelling and Simulation*, Perth, Australia. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand. 3684-3690

## ANEXO

Segue uma breve descrição, de acordo com Neitsch et al. (2005b), dos parâmetros relacionados ao fluxo de água, no modelo SWAT, utilizados para a análise de sensibilidade e calibração.

### Alpha-BF

Fator alfa do fluxo de base, valor definido em dias. A constante de recessão do fluxo de base é um índice direto da resposta do fluxo subterrâneo a mudanças na recarga. Os valores variam de 0,1 a 0,3 para terrenos com resposta lenta à recarga e de 0,9 a 1,0 para terrenos com uma rápida resposta.

### Biomix

Eficiência do revolvimento biológico, a redistribuição das propriedades de determinado solo devido à atividade biológica que nele ocorre. A atividade biológica é significativa em sistemas onde os distúrbios no solo não ocorrem repetidamente. De maneira geral, na medida em que o manejo do solo muda do plantio convencional para plantio direto haverá um aumento da atividade biológica. O SWAT considera que o revolvimento biológico pode ocorrer até 300 de mm profundidade, variando de acordo com o tipo de solo.

### BLAI

Índice do potencial máximo de área foliar, parâmetro usado para quantificar o desenvolvimento foliar durante a fase de crescimento da planta. O índice é calculado dividindo a área foliar pela área ocupada no terreno, sendo necessário montar campos experimentais para representar a densidade das plantas ou então a o índice de área foliar máximo, com valores de séries temporais de no mínimo dois anos.

### Canmx

Armazenamento máximo do dossel (mm H<sub>2</sub>O), este parâmetros faz parte dos arquivos da HRU. O Canmx é a quantidade máxima de água que pode ser retida no dossel, quando este está totalmente desenvolvido. O dossel das plantas afeta significativamente a infiltração, escoamento superficial e evapotranspiração. Quando o escoamento superficial é calculado pelo método Curva Número a interceptação pelo dossel é agregada as perdas iniciais. A bacia do Rio Jardim é essencialmente agrícola, mas ainda preserva uma pequena porção com áreas de vegetação nativa.

### CH-K2

Condutividade hidráulica efetiva do canal principal, os rios podem ser classificados em função de sua relação como escoamento de base. O rio que perde água para o subsolo denomina-se influente, o que recebe água subterrânea é classificado em efluente. E existem rios que recebem água subterrânea e perdem água, mutuamente, sendo denominados *flow-through stream*. Para rios perenes e que recebem constantemente água do escoamento de base a condutividade hidráulica será igual a zero.

CH-N2

Coefficiente de rugosidade de Manning, valor n de Manning para o canal principal.

CN2

Valor do Curva Número (SCS) para a condição de umidade II. O SCS Curva-Número é uma função de permeabilidade do solo, uso do solo e condições antecedentes de água no solo. Os valores de CN são tabelados, e são considerados pelo SWAT para uma declividade de 5%.

Epc0

Fator de compensação para absorver água pelas plantas. A quantidade de água absorvida em um dado dia é função da quantidade demandada pelas plantas e a quantidade de água disponível ao longo do perfil do solo. Na medida em que o teor de umidade das camadas superficiais do perfil diminui, as plantas compensam nas camadas mais profundas. Seu valor varia de 0.01 a 1.0, quando o valor é próximo de 1, o modelo extrai mais de camadas mais baixas, e quando esse valor se aproxima de 0, o modelo permite uma menor variação, mais parecida com a distribuição original.

Esco

Fator de compensação da evaporação do solo. Este coeficiente permite a alteração da distribuição da demanda evaporativa do solo em profundidade, para considerar o efeito de capilaridade. Seu valor varia de 0.01 a 1.0, quando o valor é reduzido, o modelo extrai mais da demanda evaporativa de camadas mais baixas (Figura 47).

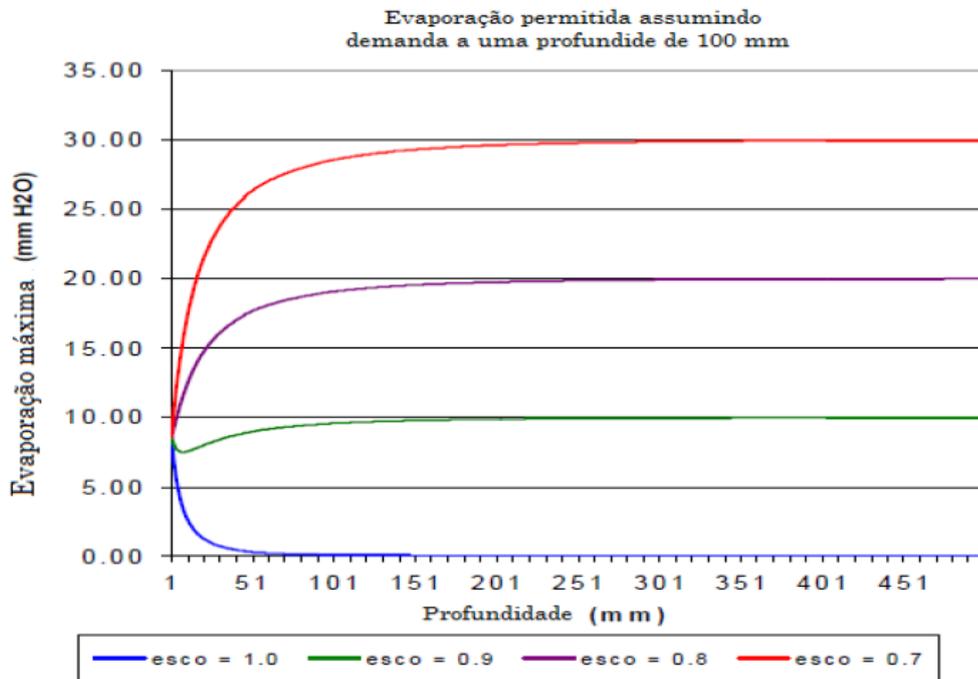


Figura 47: Distribuição da demanda evaporativa do solo em profundidade (Adaptado de Neitsch *et al.*, 2005b).

#### GW-delay;

Tempo de atraso da água subterrânea. A água se move para uma profundidade inferior do perfil de solo por percolação e entra no fluxo através da zona vadosa antes de iniciar a recarga do aquífero raso. O atraso entre o tempo que a água sai do perfil de solo e entra no aquífero raso, irá depender da profundidade do lençol freático e das propriedades hidráulicas da formação geológica das zonas vadosa e de água subterrânea. Esse tempo de retardo não pode ser medido diretamente, ele pode ser estimado através de simulações da recarga do aquífero utilizando valores diversos para o tempo de atraso, e comparado com valores observados ao nível do lençol freático.

#### GW-QMN

Profundidade limite de água requerida no aquífero raso, para que ocorra o fluxo de base. O fluxo de água subterrânea só atingirá a superfície se a profundidade da água no aquífero raso for igual ou superior ao GW-QMN.

#### GW-revap

Coeficiente "revap" de água subterrânea. A água pode se mover do aquífero raso para uma zona insaturada sobrejacente. Nos períodos de estiagem, a franja capilar que separa as zonas saturada e insaturada irá evaporar no sentido de baixo para cima, e assim, na medida em que a água evapora da franja capilar, o aquífero reabastece a própria franja capilar. A água também poderá ser retirada de aquíferos por plantas com raízes profundas, principalmente

quando a zona saturada estiver próxima da superfície. Devido ao fato do tipo cobertura vegetal afetar o balanço hidrológico, os parâmetros que governam o Revap podem ser alterados de acordo com o tipo de uso do solo. Esse parâmetro deve variar entre 0,02 e 0,20. Na medida em que os valores de Gw\_revap se aproximam de 0, o movimento de água de um aquífero raso para a zona que contém raízes é restringido, enquanto valores próximos de 1 a taxa de transferência do aquífero para a zona radicular aproxima-se as taxas de evapotranspiração potencial.

#### RCHRG-DP

Fração de percolação para o aquífero profundo. Fração da percolação da zona de raízes que recarrega o aquífero profundo. O valor para esse parâmetro deve variar entre 0 e 1.

#### Revapmn

Profundidade limite no aquífero raso para que possa ocorrer "revap" ou percolação. O movimento de água de um aquífero raso para a zona insaturada é permitida apenas se o volume de água no aquífero raso for maior ou igual ao Revapmn.

#### Slope

Declividade média da rampa, parâmetro calculado a partir do modelo digital de elevação.

#### Slsbbsn

Comprimento da declividade média, Lslp, deve ser medido do topo da encosta até o ponto onde o escoamento começa a se concentrar. Terraços podem alterar essa distância, e assim, a distância horizontal entre cada terraço é definida como o comprimento da declividade média. O comprimento da declividade média geralmente é superestimado, e o modelo adota 50 como um valor padrão caso não seja inserido nenhum dado, valor assumido para todas HRUs dentro de cada sub-bacia.

#### Sol-Alb

Albedo do solo úmido, razão entre a quantidade de energia refletida por um corpo e a quantidade de radiação incidente, parâmetro importante no processo de evaporação. O valor atribuído ao albedo deve ser calculado quando o solo estiver próximo ou na capacidade de campo.

#### Sol-AWC

Capacidade de água disponível na camada de solo. A água disponível para a planta, também referida como capacidade de água disponível, é calculada pela subtração da quantidade de água na capacidade de campo, pela água presente no ponto de murcha.

Sol-K

Condutividade hidráulica saturada. Relaciona a taxa do fluxo de água no solo (densidade do fluxo) com o gradiente hidráulico. É a medida da facilidade do movimento da água através do perfil de solo. A condutividade hidráulica saturada,  $K_{sat}$ , é recíproca a resistência da matriz do solo ao fluxo de água.

Sol-Z

Profundidade entre a superfície do solo e a camada mais profunda.

Surlag

Coefficiente de retardo do escoamento superficial. Em grandes sub-bacias com um tempo de concentração maior que um dia, apenas uma porção do escoamento superficial irá alcançar o canal principal no dia em que foi gerado. Assim o SWAT armazena parte do escoamento superficial, para retardar a entrada de água no canal principal. O Surlag controla a fração de água disponível que irá abastecer o canal diariamente (Figura 48).

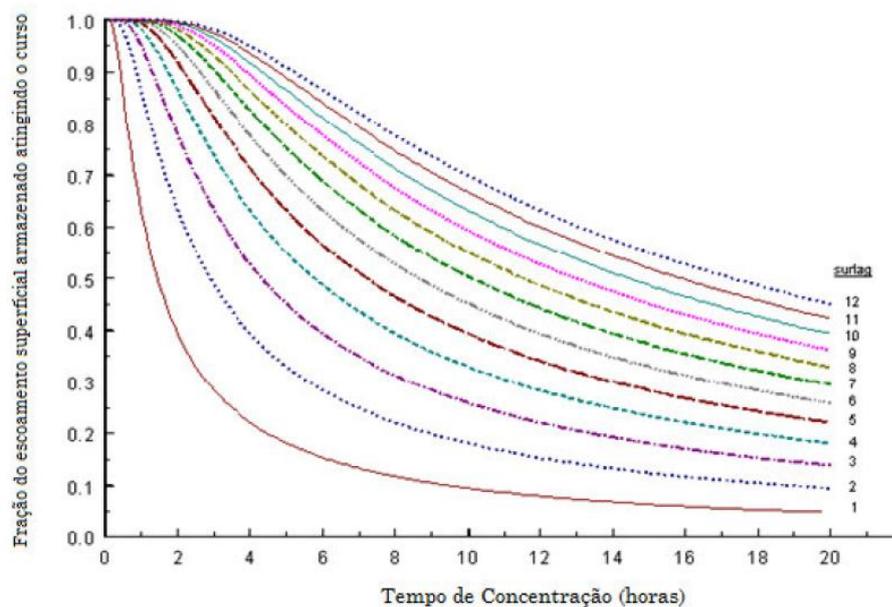


Figura 48: Influência do parâmetro Surlag e do tempo de concentração na fração do escoamento superficial liberado (adaptado de Neithsch *et al.* 2005b).