

Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Programa de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas

**SIMULAÇÃO DE VAZÃO APLICADA AO  
RESERVATÓRIO DA UHE FURNAS  
UTILIZANDO MODELO SWAT**

Viviane de Souza Dias

**SIMULAÇÃO DE VAZÃO APLICADA AO RESERVATÓRIO DA UHE  
FURNAS UTILIZANDO MODELO SWAT**

Viviane de Souza Dias

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Marta Pereira da Luz, *Dra.*

Goiânia,  
Março de 2017

Dados Internacionais de Catalogação da Publicação  
(Sistema de Bibliotecas PUC Goiás)

D541s

Dias, Viviane de Souza

Simulação de vazão aplicada ao reservatório da UHE  
Furnas utilizando modelo SWAT[ manuscrito]/ Viviane  
de Souza Dias.-- 2017.

72 f.; il. 30 cm

Texto em português com resumo em inglês

Dissertação (mestrado) -- Pontifícia Universidade  
Católica de Goiás, Programa de Pós-Graduação Stricto  
Sensu em Engenharia de Produção e Sistemas, Goiânia,  
2017.

Inclui referências f.63-70

1. Furnas Centrais Elétricas. 2. Usinas hidrelétricas.  
3. Recursos hídricos - Desenvolvimento. 4. Reservatórios  
- Grande, Rio, Bacia (MG e SP). 5. Escoamento. I. Luz,  
Marta Pereira da. II. Pontifícia Universidade Católica  
de Goiás. III. Título.

CDU: 627.81(043)

**SIMULAÇÃO DE VAZÃO APLICADA AO RESERVATÓRIO DA UHE  
FURNAS UTILIZANDO MODELO SWAT**

Viviane de Souza Dias

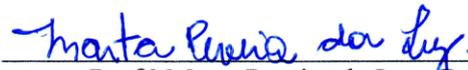
Esta Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás em MARÇO DE 2017.



---

Prof. Ricardo Luiz Machado, *Dr.*  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia de Produção e Sistemas

**Banca Examinadora:**



---

Prof.ª Marta Pereira da Luz, *Dra.*  
Orientadora



---

Prof.ª Karla Alcione da Silva Cruvinel, *Dra.*  
Examinadora Externa



---

Prof. Ricardo Luiz Machado, *Dr.*  
Examinador Interno

Goiânia – Goiás  
Março de 2017

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me abençoar a cada dia, dando-me sabedoria para superar as dificuldades e força para alcançar os objetivos.

À CAPES pelo apoio financeiro, sem o qual as pesquisas não se concretizariam.

À Prof.<sup>a</sup> Dra. Marta Pereira da Luz, orientadora, pela confiança, incentivo e paciência.

Aos Prof. Dr. Diego Tarley (PUC-Goiás), Prof. Ms. Wellington Nunes (UFG) e PhD Srinivasan (TAMU) pelo apoio e orientações. E ao Prof. Ms. Elizon Nunes (UFG) pelas contribuições.

Aos professores do mestrado pelos conhecimentos compartilhados.

Aos colegas de mestrado pela parceria e manifestações diárias de companheirismo.

A minha família e amigos pelo amor e carinho.

Resumo da Dissertação apresentada ao MEPROS/PUC Goiás como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas (M.Sc.).

## SIMULAÇÃO DE VAZÃO APLICADA AO RESERVATÓRIO DA UHE FURNAS UTILIZANDO MODELO SWAT

Viviane de Souza Dias

Março/2017

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Marta Pereira da Luz

### RESUMO

O modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é uma importante ferramenta na gestão de recursos hídricos, podendo contribuir para estimativas de vazão a reservatórios hidrelétricos. O objetivo deste estudo foi simular a vazão na área de drenagem do reservatório da UHE Furnas, localizado na bacia do rio Grande (MG). A série de dados meteorológicos e hidrológicos incluída no estudo correspondeu ao período de 01/01/1998 à 31/12/2013. No desenvolvimento do modelo foram adotadas as etapas: (1) parametrização dos dados de entrada; (2) configuração do modelo; (3) aquecimento e simulação; (4) análise de sensibilidade; (5) calibração, validação e análise dos resultados. A calibração, validação e análise de incertezas foram realizadas utilizando o algoritmo *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI-2) através do Programa de Incerteza de Calibração (SWAT-CUP). O ajuste da calibração e validação foi mensurado aplicando o P-Fator (porcentagem de dados incluídos na faixa de incerteza de 95%), o R-Fator (espessura média da faixa de incerteza) e a função objetivo *Nash e Sutcliffe* (NSE). Os valores do P-Fator corresponderam a 0,94 e 0,69 para calibração e validação, respectivamente. Os valores do NSE foram de 0,86 para a calibração e 0,64 para a validação. Os resultados encontrados apresentam precisão razoável em relação à literatura, estando dentro de intervalos considerados aceitáveis, caracterizando o modelo como adequado para simular vazões ao reservatório, se consideradas as incertezas de predição. A construção de modelos a partir do SWAT permite a definição de melhores práticas de gerenciamento de recursos hídricos e de reservatórios hidrelétricos.

Palavras-chave: Reservatório hidrelétrico. SWAT. Vazão afluente.

Resumo da Dissertação apresentada ao MEPROS/PUC Goiás como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas (M.Sc.).

## STREAMFLOW SIMULATION APPLIED TO FURNAS RESERVOIR USING SWAT MODEL

Viviane de Souza Dias

Março/2017

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Marta Pereira da Luz

### ABSTRACT

The hydrological model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is an important tool in the management of water resources, and can contribute to the estimation of streamflow to hydroelectric reservoirs. The objective of this study was to simulate the flow in the drainage area of the Furnas reservoir, located in the Rio Grande basin (MG). The series of meteorological and hydrological data included in the study corresponded to the period from 01/01/1998 to 12/31/2013. In the development of the model the following steps were adopted: (1) parameterization of the input data; (2) configuration of the model; (3) warm up and simulation; (4) sensitivity analysis; (5) calibration, validation and analysis of results. Calibration, validation and uncertainty analysis were performed using the Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) algorithm through the Uncertainty Calibration Program (SWAT-CUP). The calibration and validation adjustment was measured by applying the P-Factor (percentage of the measured data bracketed by the 95PPU), the R-Factor (mean uncertainty band thickness) and the Nash and Sutcliffe (NSE) objective function. The P-factor values corresponded to 0.94 and 0.69 for calibration and validation, respectively. The NSE values were 0.86 for the calibration and 0.64 for the validation. The results obtained show a reasonable precision in relation to the literature, being within acceptable intervals, characterizing the model as adequate to estimate reservoir flows, considering the uncertainties of prediction. The construction of models from the SWAT allows the definition of best practices of management of water resources and of hydroelectric reservoirs.

Key words: Hydroelectric reservoir. SWAT. Streamflow.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto	1
1.2 Problemática	2
1.3 Justificativa	3
1.4 Objetivos	4
1.5 Estrutura do trabalho	5
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>6</b>
2.1 Geração de energia por hidrelétricas	6
2.2 Situação atual das hidrelétricas brasileiras	9
2.3 Hidrelétricas comparadas com outras fontes de energia	13
2.4 O potencial para novas hidrelétricas no Brasil	17
2.5 Comparação com outros países	18
2.6 Modelagem hidrológica SWAT	20
2.6.1 Equação de balanço hídrico	24
2.6.2 Método de Curva Número	24
2.6.3 Método de Penman Monteith	25
2.6.4 Calibração e validação	26
2.7 Trabalhos correlatos	29
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>31</b>
3.1 Área de estudo	31
3.2 <i>Softwares</i> utilizados	33
3.3 Dados de entrada e configuração do modelo	33
3.4 Período de aquecimento e simulação	40
3.5 Análise de sensibilidade	40
3.6 Calibração e validação	42
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>44</b>
4.1 Análise da série histórica de vazão	44
4.2 Simulação da vazão	47
4.3 Análise de sensibilidade	50
4.4 Calibração e análise de incertezas	52
4.5 Validação	57
<b>5 CONCLUSÕES</b>	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>63</b>
APÊNDICE A – Características físicas do solo obtidas na literatura	71
APÊNDICE B – Parâmetros climáticos calculados para cada estação	72

# 1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo expõe o tema e sua problemática, relacionando-os com a literatura. Apresenta a motivação e os objetivos, bem como a estrutura do trabalho.

## 1.1 Contexto

As usinas hidrelétricas são as principais fontes de energia elétrica em alguns países e são responsáveis pela maior parte da energia renovável no mundo, 85% da eletricidade renovável global (IEA, 2012; LESSA *et al.*, 2015). É a principal fonte de energia renovável na América do Sul, seguida por biocombustíveis (IPCC, 2014). O Brasil tem um dos maiores potenciais hidrelétricos e a tendência é que a hidroeletricidade continue a desempenhar um papel importante nos próximos dez anos (SILVA *et al.*, 2016).

As barragens e os reservatórios não são utilizados apenas para a geração de energia, mas também para abastecimento de água, controle de inundações e para uso na irrigação, o que as diferenciam de outras fontes de energia (LESSA *et al.*, 2015). Apesar de suas vantagens, o uso de recursos hídricos para a geração de energia é dependente de condições hidrológicas (GAUDARD *et al.*, 2014; SCHAEFFER *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2016) e de condições climáticas (AHMADI *et al.*, 2015; GAUDARD *et al.*, 2013; HAGUMA *et al.*, 2014; SAMPLE *et al.*, 2015; SCHAEFLI, 2015; SPALDING-FECHER *et al.*, 2014).

Com relação às fontes de energia, as hidrelétricas possivelmente serão mais afetadas pelas mudanças na precipitação anual e sazonal e aumento da temperatura (LUMBROSO *et al.*, 2015; MUKHEIBIR, 2013). Estando também vulneráveis aos impactos das mudanças no uso do solo e da demanda de água para irrigação

(HAGUMA *et al.*, 2014; LÓPEZ-MORENO *et al.*, 2014; SPALDING-FECHER *et al.*, 2014).

Para Mukheibir (2013) os principais fatores que interferem na geração de energia elétrica são o regime de chuvas e o aumento da temperatura. Conforme o autor, existem ainda impactos indiretos: escassez de água e competição entre outros setores (como agricultura, indústrias, consumo urbano); e degradação do solo e assoreamento (dependendo da vulnerabilidade do solo à ação da água das chuvas e do rio, a escassez de vegetação e o dessecamento do solo durante períodos de seca impulsionam a erosão e o transporte de sedimentos para os reservatórios). O transporte de sedimentos por sua vez acaba interferindo na quantidade de água disponível para a geração de energia.

## **1.2 Problemática**

As mudanças hidrológicas e climáticas afetam o desempenho e a segurança de barragens de várias formas: aumento da carga de sedimentos dos rios, impactando na operação da turbina e na perda de armazenamento; aumento da evaporação da superfície dos reservatórios, reduzindo a quantidade de água disponível; alterações no regime de chuva e fluxos dos rios, interferindo na operação de plena capacidade das turbinas; e aumento da magnitude de inundações que pode levar a falhas nas barragens.

Considerando a problemática apresentada, este estudo busca responder a seguinte questão: Como o modelo SWAT poderia ser aplicado na simulação de vazão afluente, de forma que possa ser utilizado na gestão dos recursos hídricos na área de drenagem do reservatório da UHE Furnas?

### 1.3 Justificativa

Os recursos hídricos atendem a diferentes demandas e estão cada vez mais escassos devido ao aumento populacional e aos impactos de suas intervenções. A modelagem hidrológica é uma importante ferramenta para o planejamento do uso sustentável desses recursos hídricos (ABBASPOUR *et al.*, 2015).

Os modelos hidrológicos têm sido utilizados principalmente para estimar a disponibilidade hídrica e o transporte de sedimentos em bacias hidrográficas (relacionado com a quantidade e a qualidade da água disponível). Esta modelagem permite a análise das respostas hidrológicas frente a algumas mudanças, com as mudanças no uso e ocupação do solo e as mudanças no clima.

Vários modelos hidrológicos foram desenvolvidos para simular processos hidrológicos, destacando-se a Ferramenta de Avaliação do Solo e da Água (*SWAT - Soil and Water Assessment Tool*) (ARNOLD *et al.*, 1998), o Sistema Hidrológico Europeu (SHE) (ABBOTT *et al.*, 1986), e o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

No Brasil, a aplicação do modelo SWAT tem aumentado consideravelmente nos últimos 10 anos, sendo utilizado principalmente para modelagem de bacias nas regiões sul e sudeste do país (BRESSIANI *et al.*, 2015). O modelo pode ser utilizado na estimativa da disponibilidade de água em bacias hidrográficas e no planejamento do uso e ocupação do solo no entorno dessas bacias (PEREIRA *et al.*, 2016). Auxiliando, assim no gerenciamento dos recursos hídricos.

Neste estudo foi aplicada a ferramenta SWAT para simulação de vazão, a partir de dados históricos. Trata-se de um modelo de livre acesso (disponível no site <http://swat.tamu.edu/>) e de código aberto, podendo ser aplicado em diferentes cenários

para avaliação de vazão, transporte de sedimentos/agroquímicos, práticas de gestão do solo e qualidade da água. Uma outra vantagem da modelagem é a capacidade em modelar grandes bacias e permitir o estudo de impactos de longo prazo.

A ferramenta SWAT simula vazões diárias, mensais e anuais em bacias hidrográficas, adotando séries históricas diárias de variáveis climáticas (precipitação, temperatura, umidade relativa, velocidade dos ventos e radiação solar) e utilizando informações como características do terreno (declividade), uso e cobertura do solo. O modelo requer informações específicas dessas características ao invés de incorporar equações de regressão para descrever a relação entre as variáveis de entrada e saída (NEITSCH *et al.*, 2011).

O reservatório da UHE Furnas foi selecionado como objeto de estudo devido a disponibilidade de dados e a importância da usina na geração de energia no Brasil. O reservatório também foi objeto de outros estudos de vazão (RIBEIRO JÚNIOR *et al.*, 2016), porém com aplicação do modelo hidrológico de chuva-vazão (Modelo MGB-IPH), com uma abordagem direcionada ao estudo de cenários climáticos.

## **1.4 Objetivos**

O objetivo geral deste estudo foi testar o desempenho e a viabilidade da aplicação do modelo SWAT na simulação de vazão afluente na área de drenagem do reservatório da UHE Furnas.

Os objetivos específicos foram:

- (1) simular a vazão mensal, a partir de séries históricas de dados meteorológicos e dados de tipo de solo, uso do solo e declividade.
- (2) identificar os parâmetros hidrológicos do modelo que mais interferem nos resultados da simulação de vazão, para a bacia hidrográfica em estudo;

(3) calibrar e validar o modelo, de forma a identificar a viabilidade de sua aplicação em estudos futuros de cenários, sejam eles de mudança do uso e cobertura do solo, mudanças climáticas ou demanda de recursos hídricos, por exemplo para irrigação.

## **1.5 Estrutura do trabalho**

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, incluindo a Introdução. No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão da literatura que fundamenta o estudo. No Capítulo 3 são apresentados os procedimentos metodológicos adotados para alcançar os objetivos propostos. No Capítulo 4 serão apresentados os resultados. As conclusões e recomendações para pesquisas futuras são apresentadas no Capítulo 5.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Através de revisão da literatura, neste capítulo é apresentada uma visão geral da atual situação das usinas hidrelétricas no Brasil, com foco nas usinas do tipo reservatório. Também é apresentada a ferramenta utilizada na modelagem proposta, suas características e aplicações.

### 2.1 Geração de energia por hidrelétricas

A Associação Internacional de Hidrelétricas (IHA) classifica as hidrelétricas em quatro tipologias: hidrelétricas de armazenamento; hidrelétricas de bombeamento; hidrelétricas a fio d'água; e hidrelétricas marítimas. As hidrelétricas de armazenamento consistem em um sistema de grande porte que usa uma barragem para armazenar água do rio em um reservatório, sendo a energia gerada pela liberação da água. Nas hidrelétricas de bombeamento existem dois reservatórios sucessivos, nos momentos de baixa demanda a água é bombeada para o reservatório superior, sendo liberada para o reservatório inferior quando há alta demanda, gerando eletricidade. As hidrelétricas a fio d'água geram energia por meio do fluxo natural de água do rio ou de um canal de desvio, exigindo pouco ou nenhum represamento. Já as hidrelétricas marítimas utilizam correntes de marés ou força das ondas para gerar eletricidade (IHA, 2016a).

Os reservatórios armazenam água por longo período (50 anos em média), podendo gerar um fornecimento estável de eletricidade por praticamente não depender de variações de vazão natural de curto prazo e as estações a fio d'água apresentam flutuações na produção de energia devido à alternância de baixa e alta vazão ocasionada pela capacidade limitada de retenção de água (LEHNER *et al.*, 2005). Assim, alterações

nos regimes hidrológicos como o ocasionado por mudanças climáticas repercutem imediatamente sobre este tipo de usina (SCHAEFLI, 2015).

Uma das vantagens de grandes reservatórios é sua atuação como estoque de energia nos períodos de estiagem (SILVA *et al.*, 2016). Em hidrelétricas do tipo bombeamento, existe a flexibilidade de armazenamento, assim, a vulnerabilidade em relação às mudanças climáticas não pode ser diretamente deduzida a partir de mudanças no regime hidrológico, sendo dependentes de estratégias de produção específicas (SCHAEFLI, 2015).

A construção de grandes barragens está associada ao crescimento populacional e ao consequente consumo de alimentos, água e energia (CHEN *et al.*, 2016). Para os autores, estas barragens são fundamentais para a manutenção da sociedade, todavia, deve-se pensar na sustentabilidade ambiental e impactos sócio-econômicos, ou seja, na melhor forma de construir, operar e manter barragens. Vantagens e desvantagens de hidrelétricas em diferentes aspectos (IHA, 2003; MELIKOGLU, 2013):

- Econômico. Vantagens: longa vida-útil (50-100 anos ou mais); baixos custos operacionais e de manutenção; promove o desenvolvimento regional; fornece um serviço confiável; possui tecnologia comprovada; e oferece maior taxa de eficiência energética. Desvantagens: requer planejamento de longo prazo; necessita de elevado investimento inicial; depende de precipitação; necessita de envolvimento multidisciplinar; e a capacidade de armazenamento dos reservatórios pode diminuir devido à sedimentação.
- Social. Vantagens: disponibiliza água para outros usos; pode melhorar as condições de navegação; oferece em algumas situações proteção contra inundações; e mantém meios de subsistência. Desvantagens: pode envolver o

reassentamento de moradores locais; em alguns casos pode limitar a navegação; e os padrões de uso do solo poderão ser modificados.

- Ambiental: Vantagens: melhora a qualidade do ar; não produz resíduos; ajuda a desacelerar as mudanças climáticas; não consome e não polui a água utilizada para a geração de energia; e evita o esgotamento de recursos de combustíveis fósseis. Desvantagens: a qualidade da água precisa ser monitorada; modificação de regimes hidrológicos; inundação de habitat terrestre; modificação de habitats aquáticos; e exige o monitoramento de composição e transporte de sedimentos.

Desde a década de 90 possíveis emissões provenientes de reservatórios tem atraído a atenção dos cientistas, mesmo se tratando de uma fonte renovável de energia, em reservatórios de hidrelétricas há emissões potenciais de gases de efeito estufa, a exemplo de: metano (CH<sub>4</sub>); óxido nitroso (N<sub>2</sub>O); e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O quantitativo de emissões varia de acordo com a idade do reservatório, o tipo de uso da terra antes do represamento, práticas de gestão e condições climáticas (IEA, 2012; LESSA *et al.*, 2015) ou localização e morfometria do reservatório (ZARFL *et al.*, 2015).

Os estudos indicam que áreas do complexo hidrelétrico de Belo Monte no estado do Pará podem atuar como potenciais emissoras de gases de efeito estufa, devido à decomposição de matéria orgânica por microrganismos aquáticos. As pesquisas foram realizadas em ambientes de mata ciliar e pastagens, e as concentrações mais significativas foram de CO<sub>2</sub> com valor médio diário de 10.448,41±3.036,48 mg m<sup>-2</sup> para pastagens e 8.004,50±1.314,98 mg m<sup>-2</sup> para floresta (LESSA *et al.*, 2015).

As emissões de gases de efeito estufa em reservatórios são maiores nos dez primeiros anos (FEARNSIDE, 2015), como exemplo, a usina de Belo Monte poderá produzir 1 milhão de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, durante os dez primeiros anos (ALVES;

UTURBEY, 2010; JONG *et al.*, 2015). Barragens como a Jirau e Santo Antônio terão menores emissões, em função do tamanho dos reservatórios (FEARNSIDE, 2015).

## **2.2 Situação atual das hidrelétricas brasileiras**

De acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil possui um grande potencial hidrelétrico, totalizando 92.392,8 MW, o correspondente a 61.3% da matriz energética. Com 1.215 plantas em operação, abrangendo central geradora hidrelétrica, usina hidrelétrica e pequena central hidrelétrica. As 203 usinas hidrelétricas (UHE) em operação são responsáveis por 61,12% da capacidade total instalada no país, que corresponde a 87.136,2 MW. As pequenas centrais hidrelétricas (PCH), 457 no total, correspondem a 3,38% do total de potência instalada. Já as 556 centrais geradoras hidrelétricas (CGH) em operação perfazem apenas 0,3% da potência instalada (ANEEL, 2016a).

A maior usina hidrelétrica brasileira é a de Itaipu, localizada no rio Paraná (SILVA *et al.*, 2016). Após sua construção, a hidrelétrica Belo Monte na bacia Amazônica será a terceira maior usina hidrelétrica do mundo (11.233 MW). A segunda maior é a Itaipu, com 14.000 MW, e a primeira a hidrelétrica Três Gargantas, na China, com 22.500 MW (LESSA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2016). As principais usinas brasileiras com reservatório de regularização por região e por importância em volume útil armazenado são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais hidrelétricas com reservatórios no Brasil

Região	Hidrelétrica	Rio	Potência (MW)	Volume útil (Km <sup>3</sup> )	Km <sup>3</sup> /GW
Norte	Tucuruí	Tocantins	8.370	38,98	4,7
Norte	Balbina	Uatumã	250	10,22	40,9
Nordeste	Sobradinho	São Francisco	1.050	28,67	27,3
Sudeste/Centro-Oeste	Serra da Mesa	Tocantins	1.275	43,25	33,9
Sudeste/Centro-Oeste	Furnas	Grande	1.312	17,22	13,1
Sudeste/Centro-Oeste	Três Marias	São Francisco	396	15,28	38,6
Sudeste/Centro-Oeste	Itumbiara	Paranaíba	2.280	12,45	5,5
Sudeste/Centro-Oeste	Emborcação	Paranaíba	1.192	13,06	11,0
Sudeste/Centro-Oeste	Nova Ponte	Araguari	510	10,38	20,4
Sudeste/Centro-Oeste	Capivara	Paranapanema	640	5,72	8,9
Sudeste/Centro-Oeste	Irape	Jequitinhonha	360	3,70	10,3
Sudeste/Centro-Oeste	Serra do Facão	São Marcos	213	3,45	16,2
Sudeste/Centro-Oeste	A.A. Laydner	Paranapanema	98	3,17	32,4
Sudeste/Centro-Oeste	Chavantes	Paranapanema	414	3,04	7,3
Sudeste/Centro-Oeste	Manso	Manso	210	2,95	14,1
Sudeste/Centro-Oeste	Paraibuna	Paraíba do Sul	85	2,37	27,9
Sudeste/Centro-Oeste	Barra Bonita	Tietê	140	1,33	9,5
Sudeste/Centro-Oeste	Camargos	Grande	46	0,67	14,6
Sul	Fóz do Areia	Iguaçu	1.676	5,80	3,8
Sul	Passo Real	Jacuí	158	3,36	21,2

Fonte: Ministério de Minas e Energia (MME, 2015).

A usina hidrelétrica de Serra da Mesa, no rio Tocantins, apresenta o maior volume útil, com 43,25 Km<sup>3</sup>; seguida pela usina Tucuruí, no mesmo rio, com 38,98 Km<sup>3</sup>, se destacando em termos de potência instalada com 8.370 MW (MME, 2015). Normalmente os níveis dos reservatórios ficam mais elevados no verão, de dezembro a março (período de chuvas mais abundantes); e mais baixos, entre abril e novembro, períodos de seca (SILVA *et al.*, 2016).

No contexto de pequenas centrais hidrelétricas, estudos recentes abordam a situação atual das PCH no Brasil, expondo regulamentos e políticas para o crescimento do número de centrais e as perspectivas para o setor (FERREIRA *et al.*, 2016). As PCH brasileiras estão em expansão por apresentarem características como pequena área de ocupação e impactos ambientais menores, além da possibilidade de instalação mais próxima aos locais de consumo, o que reduz a perda de energia na transmissão e, consequentemente, a redução de custos para o consumidor.

A maioria dos reservatórios brasileiros, com capacidade de armazenamento maior que 0,37 TWh, estão localizados na região sudeste, na bacia do rio Paraná (HUNT *et al.*, 2014). A concentração de usinas hidrelétricas é maior nas regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste do país (Figura 1).

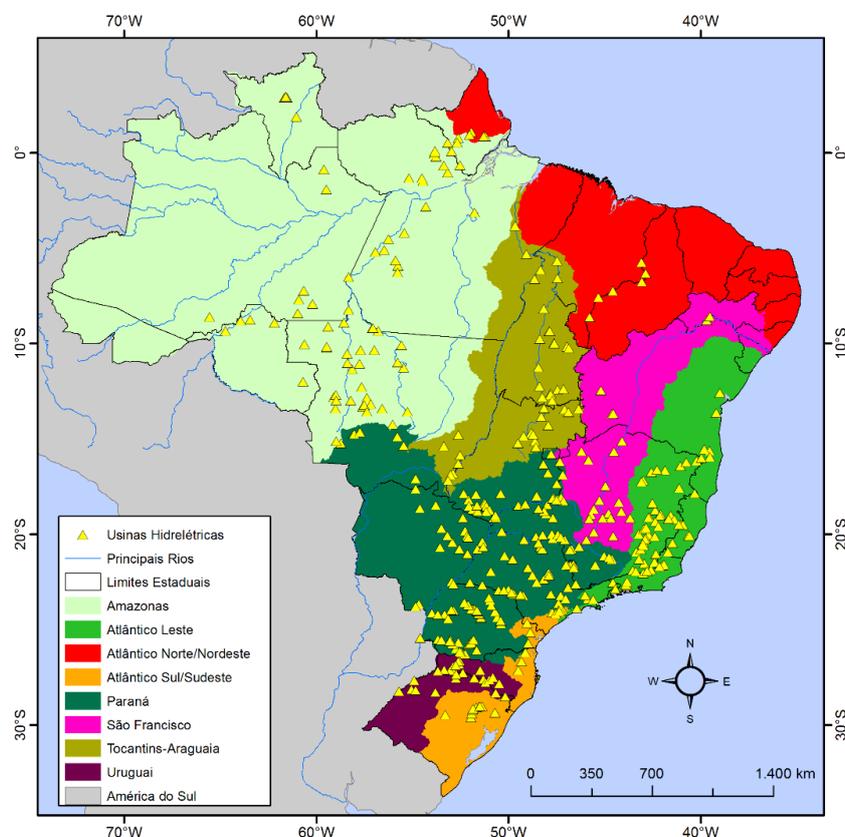


Figura 1 - Usinas hidrelétricas brasileiras por bacia hidrográfica

A bacia do rio Paraná possui a maior capacidade instalada de energia elétrica. Os maiores reservatórios hidrelétricos estão instalados próximo às regiões de maior demanda. A região sudoeste possui cerca de 70% da capacidade de armazenamento de energia. Quando cheios, estes reservatórios podem armazenar energia para atender a demanda durante cinco meses, período bem inferior ao que era observado na década de 70, em que a energia armazenada nos reservatórios, quando cheios, poderia suprir a demanda por três ou quatro anos (HUNT *et al.*, 2014). Estas alterações surgem como

resultado das mudanças climáticas e ambientais, além do aumento da demanda de energia impulsionada pelo crescimento populacional.

### 2.2.1 Políticas recentes para o desenvolvimento de hidrelétricas

No Brasil, as fontes de energia renováveis são consideradas fundamentais para o desenvolvimento sustentável (RIBEIRO *et al.*, 2016). Duas estratégias com relação ao setor de energia têm sido incorporadas no Brasil: uma com foco em uma matriz energética limpa e renovável, principalmente de hidrelétricas; e a outra pela promoção do uso e conservação eficiente (POTTMAIER *et al.*, 2013). Contudo, o país necessita rever as políticas energéticas atuais no contexto do crescimento econômico e considerar as mudanças climáticas, sendo necessário investimentos em eficiência energética, fontes renováveis e melhorias tecnológicas (PRADO JR. *et al.*, 2016).

Para a construção e operação de uma nova usina hidrelétrica os seguintes procedimentos técnicos e sócio-ambientais devem ser seguidos: estudos sobre a viabilidade técnica e econômica da usina hidrelétrica; licenciamento ambiental; preparação do plano ambiental básico a ser implementado pela concessionária de energia; aquisição das licenças de instalação e licença de exploração; pagamento da compensação financeira ou *royalties* pela concessionária de energia no início da operação da usina (WESTIN *et al.*, 2014).

O Brasil optou por aumentar os níveis de segurança energética, aumento da capacidade de geração de energia, e com esta ampliação surgem problemas ambientais e sociais. Com a finalidade de evitar maiores impactos ambientais, as estratégias vão em direção a novos projetos de hidrelétricas a fio d'água, no entanto, esta política acaba afetando a geração de energia nos períodos de estiagem, devido à redução de vazão dos rios (SILVA *et al.*, 2016; SOITO; FREITAS, 2011). Para alcançar a segurança

energética, o país tem investido em usinas hidrelétricas e térmicas; as térmicas para compensar a menor geração nos períodos de seca pelas hidrelétricas (PRADO JR. *et al.*, 2016).

Grandes reservatórios maximizam a produção de eletricidade, garantindo maior segurança energética do sistema durante os períodos de seca, mas podem contribuir com as emissões de gases de efeito estufa em função da grande área inundada e também provocar modificações nos fluxos dos rios (SPALDING-FECHER *et al.*, 2014; WESTIN *et al.*, 2014). Entretanto, a implantação de hidrelétricas a fio d'água também pode contribuir para o aumento das emissões indiretamente, com a necessidade de complementação do potencial hidrelétrico por usinas termelétricas (PRADO JR. *et al.*, 2016).

Em esquemas a fio d'água, os impactos ambientais são menores, o tempo de construção é menor, em média dois anos, mas os custos da energia são mais elevados em decorrência da possibilidade de inatividade nos períodos de seca, devido à ausência de um reservatório (SILVA *et al.*, 2016). O tempo de construção médio de grandes barragens é de 8,6 anos (ANSAR *et al.*, 2014). Com relação aos impactos ambientais, devem ser considerados os efeitos cumulativos de várias usinas a fio d'água instaladas em uma mesma bacia (SILVA *et al.*, 2016).

### **2.3 Hidrelétricas comparadas com outras fontes de energia**

As fontes de energia renováveis hídrica, eólica, biomassa, solar e geotérmica estão entre as mais importantes para a geração de energia, reduzindo impactos ambientais relacionados à produção de energia por combustíveis fósseis (FERREIRA *et al.*, 2016). No Brasil, 73% da energia gerada provém de fontes renováveis (EPE, 2015). A matriz energética brasileira (Figura 2) é composta principalmente por hidrelétricas

(61,30%), seguida por combustíveis fósseis (17,39%), biomassa (8,86%), eólica (5,70%), importação (5,42%); nuclear (1,32%); e solar (0,02%) (ANEEL, 2016b).

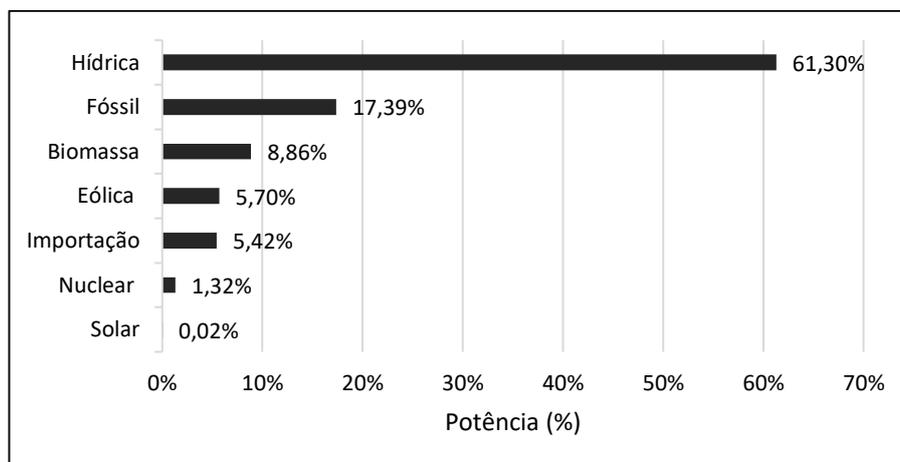


Figura 2 - Geração de eletricidade no Brasil por fonte - Matriz energética  
Fonte: Adaptado de ANEEL (2016b).

As 38 usinas de energia solar são responsáveis por 22.933 KW da capacidade instalada, apenas 0.02% da matriz energética. Cerca de 5,42% da potência utilizada vem da importação de países como Paraguai, Argentina, Venezuela e Uruguai (ANEEL, 2016b). Apesar do país ter áreas com alta incidência solar, existe a necessidade de investimentos em tecnologias nacionais (POTTMAIER *et al.*, 2013), grande parte dos equipamentos necessários para a implantação de usinas solar fotovoltaica e de energia solar concentrada são importados, possuindo custos elevados (JONG *et al.*, 2015).

Estão em operação 1.215 hidrelétricas, 368 centrais geradoras eólicas, 38 centrais geradoras solar fotovoltaicas, 2.895 usinas termelétricas e duas usinas termonucleares. Dos empreendimentos em construção, o maior número (133) são usinas eólicas, seguidas pelas pequenas centrais hidrelétricas (35). Existem investimentos previstos para a construção de mais 256 usinas eólicas (ANEEL, 2016a).

No Brasil, os parques eólicos podem se tornar mais competitivos do que usinas hidrelétricas por se tratar da tecnologia de geração de energia mais barata, quando

considerados aspectos como custos e perdas sociais, ambientais e em relação à extensão do sistema de transmissão (JONG *et al.*, 2015). Os sistemas eólicos e hidrelétricos podem atuar de forma complementar, a produção de energia eólica é maior no segundo semestre do ano, onde há a queda de produção pelas hidrelétricas (SCHMIDT *et al.*, 2016).

O incentivo ao uso da energia solar e eólica pode contribuir para a redução dos gases de efeito estufa e para o desenvolvimento social e econômico brasileiro (RIBEIRO *et al.*, 2016). A biomassa como fonte de energia também é interessante devido ao quantitativo de resíduos provenientes da agricultura e indústrias de produtos florestais, sendo extraída principalmente do setor sucroalcooleiro (JONG *et al.*, 2015; POTTMAIER *et al.*, 2013).

Fontes como biomassa, do bagaço e da palha da cana de açúcar, e a eólica podem contribuir significativamente para a geração de energia em períodos com menor intensidade de chuvas, pois coincide com o potencial mais intenso destas fontes (SILVA *et al.*, 2016). Podendo complementar a geração de hidroeletricidade no período de maior fragilidade, principalmente as usinas do tipo a fio d'água.

A grande variabilidade anual nas condições hidrológicas e a intensa sazonalidade das chuvas podem colocar em risco o sistema hidrotérmico brasileiro de geração de energia, contudo uma complementariedade entre sistemas hidrelétricos, eólicos e solar fotovoltaico poderia contribuir para a estabilidade da produção e a diminuição da geração por termelétricas (SCHMIDT *et al.*, 2016).

Com relação a matriz energética brasileira algumas questões precisam ser levantadas, como a necessidade de expansão da geração de energia hidrelétrica, aumento do desenvolvimento de outras fontes renováveis, otimização da geração intermitente de energia e a redução do uso de combustíveis fósseis como petróleo, gás

natural e carvão (SILVA *et al.*, 2016). Todavia, ainda são necessárias políticas governamentais eficazes, isenções fiscais e subsídios para alavancar este propósito (JONG *et al.*, 2015).

As variações futuras no clima, em termos globais, podem afetar não só a produção de energia por hidrelétricas, como também outros sistemas de produção de energia. Schaeffer *et al.* (2012) elencam os principais impactos de variáveis climáticas (temperatura, precipitação, umidade e ventos) e eventos climáticos extremos em fontes de energia renováveis:

- Hidrelétrica. Impactos na disponibilidade total e sazonal de água, mudanças na operação do sistema hidrelétrico e evaporação dos reservatórios;
- Termelétrica (gás natural, carvão e nuclear). Impactos na eficiência de resfriamento e na eficiência operacional da turbina, interrupções de geração marítima e erosões em mineração de superfície;
- Óleo e gás. Impactos na quantidade e qualidade do resfriamento da água em refinarias de óleo, interrupções na extração e no transporte da produção;
- Biomassa. Impactos nos regimes de cultivo e no rendimento de bioenergia das culturas;
- Energia eólica. Mudanças nos regimes dos ventos (intensidade, duração e direção);
- Energia solar. Alterações na eficiência em função de mudanças da radiação;
- Geotérmica. Impactos sobre a eficiência de resfriamento;
- Energia das ondas. Mudanças nos recursos das ondas.

## 2.4 O potencial para novas hidrelétricas no Brasil

Considerando o foco da expansão de hidrelétricas na Amazônia, em decorrência do potencial hidrelétrico quase esgotado em outras regiões brasileiras (SOITO; FREITAS, 2011), preocupações ambientais importantes são levantadas com relação ao potencial hidrelétrico na região Amazônica e estudos relacionam os impactos provocados por barragens nesta região: emissões de gases de efeito estufa devido ao alagamento de áreas florestais; perda de áreas de conservação; alterações na qualidade da água; interferência no deslocamento e reprodução de animais aquáticos; declínio da biodiversidade; e impactos sociais e culturais (PRADO JR. *et al.*, 2016; WESTIN *et al.*, 2014).

As restrições sócio-ambientais e as vulnerabilidades de utilização do potencial hidrelétrico, por região brasileira, são descritas (SOITO; FREITAS, 2011): riscos de inundações em grandes áreas (região Norte); poucos rios perenes (região Nordeste e Sul); rios de fronteira, inundações e poluição agroindustrial (região Sudeste); e rios de fronteira com elevados níveis de assoreamento (região Centro-oeste). Grande parte das UHE em construção estão situadas no estado de Mato Grosso e no Paraná (Tabela 2).

Tabela 2 - Usinas hidrelétricas em construção e planejadas

Em construção			Planejada		
Usina	Potência outorgada (KW)	Rio/ Estado	Usina	Potência outorgada (KW)	Rio / Estado
Ponte de Pedra	30.000	Ponte de Pedra / MT	Tibagi Montante	32.000	Tibagi / PR
Salto Apicás	45.000	Apicás / MT	Cachoeirinha	45.000	Chopim / PR
São Roque	141.900	Canoas / SC	Itumirim	50.000	Corrente / GO
Colíder	300.000	Teles Pires / MT	São João	60.000	Chopim / PR
Baixo Iguaçu	350.200	Iguaçu / PR	Itaocara I	150.000	Paráíba Sul / RJ
Sinop	400.000	Teles Pires / MT	Pai Querê	292.000	Pelotas / SC
São Manoel	700.000	Teles Pires / MT			

Fonte: Adaptado de ANEEL (2016a).

A usina com reservatório (Sinop) e a usina a fio d'água (São Manoel), situadas na bacia Amazônica, estão previstas para entrar em operação em 2018. O reservatório hidrelétrico São Roque, bacia Uruguai, tem previsão de operação parcial já em 2017.

## 2.5 Comparação com outros países

A energia hidrelétrica é considerada uma fonte de energia limpa e renovável, contribui para mais de 16% da geração de eletricidade no mundo e 85% de eletricidade renovável global. Segundo estimativas, até 2050 a produção hidrelétrica pode dobrar, contribuindo para a redução de emissões de CO<sub>2</sub> oriundas das usinas de combustíveis fósseis. Países como a África, Ásia e América Latina possuem um potencial adicional de energia hidrelétrica considerável, de acordo com as estimativas o maior adicional será o da Ásia, de aproximadamente 1.500 TW h<sup>-1</sup> (2015) para 3.100 TW h<sup>-1</sup> (2050), seguido pela América Latina, 600 TW h<sup>-1</sup> (2015) para 1.500 TW h<sup>-1</sup> (2050) (IEA, 2012). Os cinco maiores produtores de hidroeletricidade do mundo são: China, Canadá, Brasil, Estados Unidos e Rússia (IEA, 2015).

A maioria das grandes barragens foram construídas nas bacias de grandes rios, como exemplo: rio Danúbio e Reno (Europa); Mississipi (América do Norte); rio Yangtzé e Ganges (Ásia) (CHEN *et al.*, 2016). Apesar dos esforços em alguns países, os recursos de energia elétrica não-renovável (como carvão, óleo e urânio) não serão totalmente substituídos por recursos renováveis, como as hidrelétricas, mesmo se todo o potencial hidrelétrico potencialmente viável fosse explorado, atenderia a menos da metade da demanda mundial projetada para 2040 (ZARFL *et al.*, 2015).

Ao projetar o crescimento da população, água, alimentos, consumo de energia e desenvolvimento de barragens de 2010-2050, Chen *et al.* (2016) preveem cerca de 36.813 barragens em todo o mundo, com capacidade total do reservatório de 9.204 Km<sup>3</sup>

em 2050, sendo que em 2010 haviam 32.473 barragens com capacidade de 7.975 Km<sup>3</sup>. Em termos de consumo de energia a estimativa é um aumento de 134.000 para 183.000 TW h<sup>-1</sup>. Na Tabela 3 é apresentado o número de grandes barragens concluídas de 1900 a 2010.

Tabela 3 - Número de grandes barragens concluídas em diferentes períodos

<b>Continente</b>	<b>1900–1950</b>	<b>1950–1989</b>	<b>1990–2010</b>	<b>Total</b>
Mundo	465	1999	351	2815
América do Norte	313	567	36	916
Ásia	35	596	161	792
Europa	68	441	77	586
América do Sul	25	174	46	245
África	13	146	29	188
Oceania	11	75	2	88

Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2016).

A maior parte das grandes barragens foram construídas entre os anos de 1950-1989, estando relacionado ao crescimento populacional e ao aumento do consumo de energia. A redução a partir da década de 90, deve-se a preocupações sociais e ambientais. Com relação ao uso principal, 39% foram construídas para geração de energia, 29% para irrigação, 14% para controle de enchentes, 8% para o abastecimento de água e 10% para outros usos (CHEN *et al.*, 2016). No Brasil, houve ampliação da implantação de grandes hidrelétricas nas décadas de 60 e 70 devido às alterações nos critérios tarifários; e redução da construção de novos empreendimentos nos anos 80 e 90 devido à elevação da inflação e aos dois choques do petróleo (MELLO, 2011).

As futuras barragens estarão concentradas em países em desenvolvimento e economias emergentes (Sudeste Asiático, América do Sul e África), Figura 3, cerca de 75% das barragens serão de médio e pequeno porte (1-100 MW) e 93% da capacidade futura de energia hidrelétrica será fornecido por grandes barragens (mais de 100 MW) (ZARFL *et al.*, 2015).

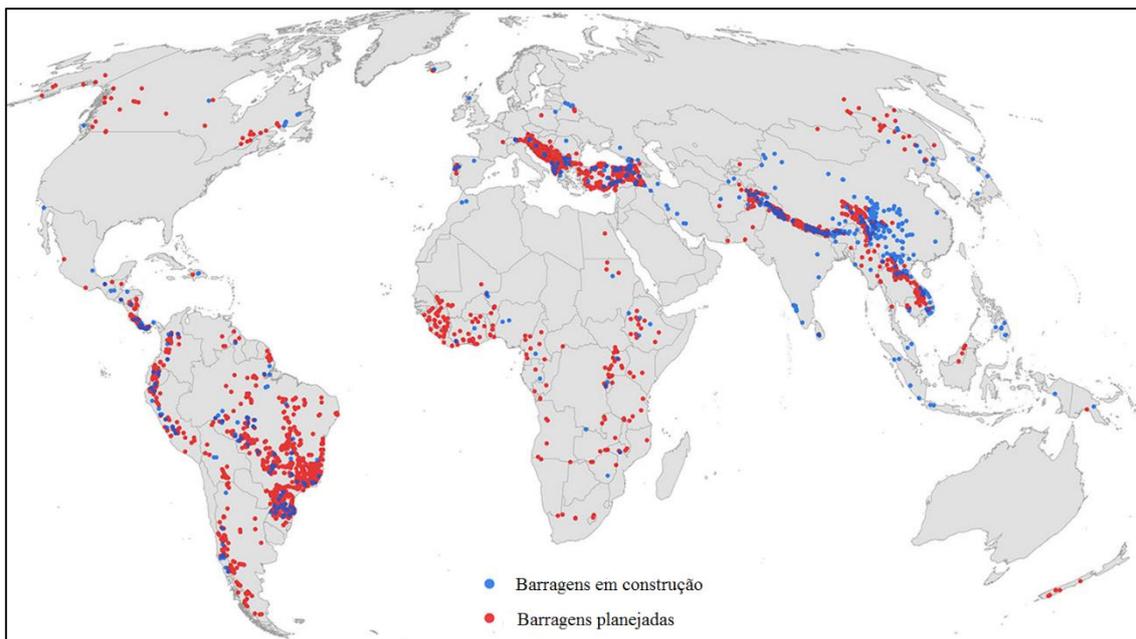


Figura 3 - Distribuição global das futuras barragens hidrelétricas, em construção (pontos azuis – 17%) ou planejadas (pontos vermelhos – 83%)  
 Fonte: Zarfl *et al.* (2015).

No Brasil, as barragens em construção se concentram nas regiões Norte e Sul e as planejadas nas regiões Sul e Sudeste do país. O número de barragens hidrelétricas planejadas ou em construção por bacia é maior na América do Sul e na Ásia (maior que 100 barragens por bacia), o que implica em impactos ambientais significativos em função da fragmentação de grandes sistemas fluviais e consequente diminuição do fluxo livre dos rios, comprometendo espécies de água doce e potencializando as emissões de gases de efeito estufa (ZARFL *et al.*, 2015).

## 2.6 Modelagem hidrológica SWAT

A ferramenta de avaliação do solo e da água (*SWAT - Soil and Water Assessment Tool*) corresponde a um modelo hidrológico físico e semidistribuído que simula o ciclo hidrológico diário, sedimentos, desenvolvimento de culturas e transporte de nutrientes e agroquímicos em uma bacia (VIGIAK *et al.*, 2015). Foi originalmente desenvolvido para modelar grandes bacias (ARNOLD *et al.*, 1998).

O modelo SWAT foi desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold do Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS) dos Estados Unidos, no início da década de 90, para prever o impacto das práticas de gestão do solo nos recursos hídricos, sedimentos e rendimentos de químicos agrícola (NEITSCH *et al.*, 2011). Uma das vantagens do modelo é a possibilidade de simulações contínuas e a longo prazo (SUN *et al.*, 2013).

As variáveis climáticas necessárias para entrada no modelo SWAT são: precipitação diária; temperatura máxima; temperatura mínima; umidade relativa; velocidade do vento; e radiação solar. Estas condições meteorológicas podem ser inseridas no modelo através de dados observados ou geradas através do gerador climático (dados climáticos diários podem ser gerados de acordo com os valores das médias mensais). O modelo também requer informações sobre a topografia, propriedades do solo, práticas de gestão do solo e vegetação da bacia (NEITSCH *et al.*, 2011). A precipitação é uma das variáveis de entrada mais importante na modelagem hidrológica (STRAUCH *et al.*, 2012).

A modelagem é realizada em duas fases: a fase do terreno no ciclo hidrológico que controla a quantidade de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas carregados para o canal principal em cada sub-bacia; e a fase de água (ou roteamento do ciclo hidrológico) que corresponde a propagação de água e sedimentos através da rede de canais da bacia para a saída (VIGIAK *et al.*, 2015).

Na fase de terra a bacia é subdividida em sub-bacias, e estas em Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's). Os diferentes pontos das sub-bacias são ligados à rede fluvial, e o movimento da água até a saída da bacia é determinado pela fase de roteamento (DU *et al.*, 2013). As HRU's são áreas com o mesmo uso e cobertura de terra e tipos de solo, no qual o comportamento hídrico é considerado homogêneo. O modelo delimita as unidades através dos mapas de uso e cobertura do solo, de

propriedades do solo e de declividade. A delimitação da bacia melhora a descrição física do equilíbrio hídrico, uma vez que os diferentes usos e propriedades dos solos interferem nos cálculos da evapotranspiração (evaporação do solo e transpiração das plantas) (NEITSCH *et al.*, 2011).

A ferramenta possui diversos módulos operacionais (Figura 4) e vem sendo aplicada em simulações hidrológicas considerando diferentes cenários: mudanças no uso da terra (SUN *et al.*, 2013; WAGNER *et al.*, 2016); mudanças no uso e cobertura do solo relacionada às mudanças climáticas (STRAUCH *et al.*, 2012; ZHANG *et al.*, 2015); estimativa de vazão adotando cenários climáticos futuros (HUANG *et al.*, 2015; ZHOU *et al.*, 2015); estimativa de vazão em função de dados históricos (FERNANDES, 2015; SALLES, 2012); avaliação da qualidade da água (ROCHA *et al.*, 2015); e transporte de agroquímicos em bacia hidrográfica (BANNWARTH *et al.*, 2014).

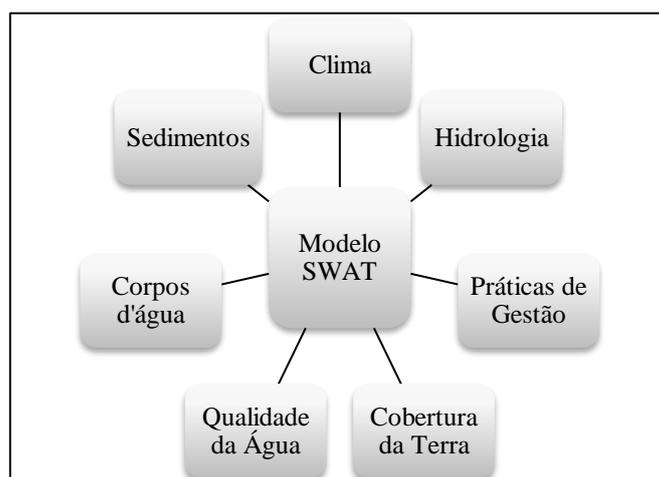


Figura 4 – Módulos incluídos no modelo SWAT  
Fonte: Adaptado de Romanowicz *et al.* (2005).

Considerando estes diferentes módulos, Bressiani *et al.* (2015) relacionaram as principais aplicações do modelo SWAT no Brasil nos últimos 16 anos: simulação de vazão e transporte de sedimentos; análise de qualidade da água e transporte de

nutrientes. Os autores ainda destacam que a disponibilidade e consistência dos dados é um dos obstáculos para a maior aplicação do modelo no país.

O modelo SWAT é baseado na equação de balanço hídrico e possui diferentes configurações. Utiliza o método de Curva Número (CN) ou o método *Green-Ampt* para estimar o escoamento superficial. Possui três métodos para estimar a evapotranspiração: *Penman-Monteith*, *Priestley-Taylor* e *Hargreaves*. O método Hipercubo Latino (*Latin Hypercube and Sampling One-Factor-at-a-Time - LH-OAT*) é adotado para análise de sensibilidade e definição dos parâmetros de calibração.

Para cálculos do escoamento superficial, o método de Curva Número requer dados de precipitação diários e o método *Green-Ampt*, dados sub-diários. Os métodos *Penman-Monteith*, *Priestley-Taylor* e *Hargreaves* se diferenciam em função das variáveis que são utilizadas em seus cálculos. O método *Penman-Monteith* requer as variáveis climáticas: temperatura do ar; umidade relativa; velocidade do vento; e radiação solar. O método *Priestley-Taylor* requer as mesmas variáveis, com exceção da velocidade do vento. E o método *Hargreaves* requer apenas a temperatura do ar (SALLES, 2012). Neste estudo, adotou-se o método CN para estimativa do escoamento e o método de *Penman-Monteith* para estimar a evapotranspiração.

Moriasi *et al.* (2007) realizaram uma avaliação dos diferentes métodos de análise estatística para calibração em simulações de bacias e destacaram três estatísticas quantitativas: coeficiente de eficiência *Nash-Sutcliffe* (*Nash-Sutcliffe efficiency - NSE*); percentual de tendência (*percent bias - PBIAS*); e a razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão das observações (*ratio of the root mean square error to the standard deviation of measured data - RSR*). São mencionados outros métodos, contudo, a aplicação das diretrizes de avaliação varia conforme o procedimento de calibração do

modelo, a quantidade e qualidade dos dados medidos e tempo de avaliação (mensal ou diário).

### 2.6.1 Equação de balanço hídrico

O ciclo hidrológico simulado pelo SWAT é baseado na equação do balanço hídrico, que é controlado por variáveis climáticas, como precipitação e temperatura (Equação 1) (ARNOLD *et al.*, 1998; NEITSCH *et al.*, 2011):

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

Em que:  $SW_t$  é a quantidade final de água no solo (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 precipitação no dia  $i$  (mm);  $Q_{surf}$  é a quantidade de escoamento superficial no dia  $i$  (mm);  $E_a$  é a quantidade de evapotranspiração no dia  $i$  (mm);  $W_{seep}$  é a quantidade de água que percola da camada simulada para a camada inferior, no dia  $i$  (mm); e  $Q_{gw}$  é a quantidade de água que retorna ao curso d'água no dia  $i$  devido ao escoamento sub-superficial (mm).

### 2.6.2 Método de Curva Número

A ferramenta SWAT simula o impacto hidrológico proveniente das mudanças do uso da terra, através do valor da Curva Número (CN). Este parâmetro determina o escoamento superficial para diferentes tipos de solo e usos de terra (DU *et al.*, 2013). O escoamento acumulado é obtido pela Equação 2 (RAJIB; MERWADE, 2016; USDA-NRCS, 2004):

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2)$$

Em que:  $Q_{surf}$  é o escoamento acumulado ou excesso de precipitação (mm);  $R_{day}$  é a intensidade de precipitação para o dia (mm);  $I_a$  é a abstração inicial que inclui armazenamento superficial, interceptação e infiltração antes do escoamento (mm);  $S$  é o parâmetro de retenção (mm).  $I_a$  é calculado como  $0,2 S$ . O escoamento ocorre quando  $R_{day} > I_a$ .

O potencial de retenção varia em função de alterações no solo, uso da terra, declividade e umidade do solo. É obtido através da Equação 3:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

### 2.6.3 Método de Penman Monteith

O método *Penman Monteith* requer como dados de entrada temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento. A evapotranspiração pode ser estimada pela Equação 4 (NEITSCH *et al.*, 2011):

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

Em que:

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

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

$\Delta$  é a declividade da curva de pressão de vapor contra temperatura ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$H_{net}$  é a rede de radiação ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );

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

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

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

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

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

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

$r_c$  é a resistência do dossel da planta ( $\text{s m}^{-1}$ );

$r_a$  é a resistência de difusão da camada de ar (resistência aerodinâmica) ( $\text{s m}^{-1}$ ).

#### 2.6.4 Calibração e validação

A calibração do modelo é precedida pela análise de sensibilidade, que identifica a classificação dos parâmetros, apontando aqueles que servirão de entrada no processo de calibração (PIANOSI *et al.*, 2016; SARRAZIN *et al.*, 2016). No modelo SWAT os parâmetros mais sensíveis são determinados pelo método Hipercubo Latino (*Latin Hypercube and Sampling One-Factor-at-a-Time - LH-OAT*). Baseia-se na simulação de Monte Carlo, porém com uma abordagem de amostra estratificada que permite a estimativa eficiente das estatísticas de saída, com maior eficiência computacional (VAN GRIENSVEN *et al.*, 2006).

O processo de calibração consiste em mudar os valores dos parâmetros de entrada do modelo para produzir valores simulados que estão dentro de uma certa faixa dos dados mensurados. O período de calibração ideal (na modelagem hidrológica) é de 3 a 5 anos (MORIASI *et al.*, 2007).

A calibração pode ser manual ou automática. O *software* SWAT-CUP pode ser utilizado para a calibração automática. Um dos algoritmos de otimização disponíveis no *software* é o SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fltting*). O algoritmo tenta ajustar a

maioria dos dados medidos em uma faixa de 95% de incerteza de predição (95PPU), mapeando as incertezas de fontes diversas como: modelo conceitual; parâmetros; e dados de entrada. Diferentes funções objetivo podem ser aplicadas e o resultado dos intervalos dos parâmetros hidrológicos finais está condicionado ao tipo de função objetivo adotada.

Através da amostragem *Latin Hypercube*, o 95PPU é calculado nos níveis de 2,5% e 97,5% da distribuição cumulativa das variáveis simuladas. A qualidade de ajuste do modelo é obtida pela análise de dois índices, o P-Fator e o R-Fator. O P-Fator varia de 0 a 1 e corresponde à fração dos dados medidos que estão dentro da faixa de 95% de incerteza de predição (95PPU). Dessa forma,  $1 - P\text{-Fator}$  corresponde ao erro do modelo. O R-Fator corresponde à relação entre a largura média da faixa de 95PPU e o desvio padrão da variável medida. Na modelagem hidrológica, mais especificamente para vazão, um P-Fator maior que 0,7 e um R-Fator menor que 1,5 são desejáveis. Os intervalos dos parâmetros hidrológicos são tidos como calibrados quando forem encontrados valores satisfatórios dos dois fatores ou quando a função objetivo não apresenta melhoria (ABBASPOUR *et al.*, 2007; ABBASPOUR *et al.*, 2015; ROUHOLAHNEJAD *et al.*, 2012).

Bressiani *et al.* (2015) através de uma revisão da literatura relacionaram a percentagem de estudos de acordo com o intervalo adotado para calibração: menor que 1 ano (24%); de 1 a 3 anos (30%); de 3 a 5 anos (16%); de 5 a 10 anos (19%); de 10 a 15 anos (8%); e maior que 15 anos (3%). Para validação, o período de 1 a 3 anos também foi o mais adotado nos estudos.

Um dos testes estatísticos mais utilizados na calibração e validação de modelos hidrológicos é o coeficiente *Nash-Sutcliffe efficiency* (NSE) (BRESSIANI *et al.*, 2015;

DU *et al.*, 2013; YEN *et al.*, 2015). Outras medidas estatísticas comuns são o coeficiente de determinação  $R^2$  e o percentual de tendência (PBIAS) (Equações 5,6 e7).

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{med,obs})^2} \right] \quad (5)$$

$$R^2 = \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{med,obs})(y_i^{sim} - y_i^{med,sim}))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{med,obs})^2 \sum_{i=1}^n (y_i^{sim} - y_i^{med,sim})^2} \right] \quad (6)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n y_i^{obs}} \cdot 100 \quad (7)$$

Nas equações  $y_i^{obs}$  é a vazão observada;  $y_i^{sim}$  é a vazão simulada;  $y_i^{med,obs}$  é a média da vazão observada; e  $y_i^{med,sim}$  é a média da vazão simulada.

O coeficiente de eficiência NSE (GUPTA *et al.*, 1999; NASH; SUTCLIFFE, 1970) é uma estatística normalizada utilizada para determinar a magnitude da variância residual, comparando-a com a variância dos dados mensurados. Os valores maiores que 0,0 indicam o desempenho mínimo aceitável e o valor 1,0 indica combinação perfeita entre observação e simulação (MORIASI *et al.*, 2007).

O coeficiente de determinação  $R^2$  varia entre 0 e 1. O NSE pode variar a partir de  $-\infty$  a 1. Na modelagem SWAT, geralmente valores maiores que 0,5 para o NSE e 0,6 para o  $R^2$  são considerados aceitáveis (MORIASI *et al.*, 2007; SANTHI *et al.*, 2001; VAN LIEW *et al.*, 2003). O NSE descreve a variância explicada para valores observados ao longo do tempo e o  $R^2$  avalia a precisão com que o modelo acompanha a variação dos valores observados. O NSE pode interpretar o desempenho do modelo em replicar valores observados individualmente, enquanto que o  $R^2$  não pode (GREEN; VAN GRIENSVEN, 2008; WU; LIU, 2012).

O percentual de tendência (PBIAS) mensura a tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores que as observações. Os valores positivos indicam subestimativa e os valores negativos indicam superestimativa do modelo. Na Tabela 4 é apresentada a classificação dos resultados da modelagem em função dos índices de eficiência, de acordo com a literatura.

Tabela 4 - Classificação de desempenho para a modelagem SWAT (para estimativas mensais de vazão)

<b>Classificação</b>	<b>NSE</b>	<b>PBIAS (%)</b>
Muito bom	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Fonte: Moriasi *et al.* (2007).

Os parâmetros apresentados na Tabela 4 são para dados mensais, uma classificação de desempenho mais rigorosa deve ser realizada na medida em que o intervalo avaliado aumenta, por exemplo, em casos de estimativa de vazões diárias (MORIASI *et al.*, 2007).

## 2.7 Trabalhos correlatos

Salles (2012) aplicou o modelo SWAT na simulação da vazão na bacia hidrográfica do ribeirão Pípiripau, no Distrito Federal. O período de aquecimento do modelo foi de 01/10/1985 a 31/12/1988. A calibração foi realizada manualmente em função da vazão média mensal observada, em um período de dez anos (1989 a 1998). Para análise de sensibilidade foi utilizado o LH-OAT. Após o período de calibração o

modelo simulou adequadamente as vazões médias mensais do ribeirão, com NSE de 0,79, PBIAS de -21,49% e RSR de 0,49.

Também aplicando o modelo SWAT, porém estimando produção de sedimentos e vazão, Fernandes (2015) simulou a vazão na bacia do rio São Francisco. O período de aquecimento do modelo (*warm up*) foi de quatro anos (1988-1991) e o período de calibração foi de 1992 a 2012. O processo de calibração foi automático, através do *software* SWAT-CUP. Os resultados da calibração para dados de vazão foram satisfatórios: NSE entre 0,63 a 0,99; e  $R^2$  entre 0,64 a 0,99.

O modelo SWAT tem sido bastante aplicado na simulação de vazão em bacias hidrográficas no Brasil, havendo estudos em diferentes regiões (Quadro 1). Alguns estudos são de modelagem hidrossedimentológica, além da vazão é analisado o transporte de sedimentos na bacia hidrográfica. Outros avaliam cenários de uso do solo e qualidade da água.

<b>Autor</b>	<b>Aplicação do modelo SWAT</b>	<b>Área de Estudo</b>	<b>Extensão</b>
Rosa (2016)	Avaliou o desempenho do modelo SWAT na estimativa de produção e transporte de sedimentos e impactos de possíveis mudanças no uso do solo.	Rio Pomba (MG)	8.700 Km <sup>2</sup>
Pereira <i>et al.</i> (2016)	Avaliou a aplicabilidade do modelo SWAT na simulação de vazão.	Rio Pomba (MG)	8.600 Km <sup>2</sup>
Castro (2013)	Avaliou a aplicabilidade do modelo SWAT na simulação de vazão.	Alto Rio Jardim (DF)	105 Km <sup>2</sup>
Oliveira (2013)	Avaliou a estimativa de produção de sedimentos em função de diferentes cenários de uso do solo.	Ribeirão João Leite (GO)	766,8 Km <sup>2</sup>
Arroio Júnior (2013)	Estimou a produção de sedimentos e o monitoramento da qualidade de água aplicando o modelo SWAT.	Rio Itaqueri (SP)	220 Km <sup>2</sup>
Baldissera (2005)	Testou a aplicabilidade do modelo SWAT na simulação hidrológica, incluindo diferentes cenários de uso e ocupação do solo.	Rio Cuiabá (MT)	29.000 Km <sup>2</sup>

Quadro 1 - Estudos realizados em bacias hidrográficas brasileiras utilizando o modelo SWAT

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo delimita a área de estudo e apresenta suas características. Relaciona os *softwares* utilizados, bem como as configurações do modelo. Descreve as etapas e parâmetros adotados na execução da modelagem hidrológica SWAT.

Trata-se de uma pesquisa quantitativa aplicada e exploratória, ou seja, gera conhecimentos para aplicação prática, buscando soluções para problemas, através de linguagem matemática (CAUCHICK MIGUEL *et al.*, 2012).

### 3.1 Área de estudo

A região de estudo está situada na bacia do Rio Grande, sub bacia do Rio Paraná. A região hidrográfica do Paraná possui a maior demanda por recursos hídricos do país,  $736 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Cerca de 42% da demanda total por recursos hídricos na região é referente à irrigação e 27% ao abastecimento industrial (ANA, 2016a).

A bacia do rio Grande está localizada na região sudeste do Brasil. Possui área de drenagem de mais de 143 mil  $\text{km}^2$  e capacidade instalada de geração de energia de cerca 7.800 MW. No que tange à área de drenagem, 60,2% está situada no estado de São Paulo e 39,8% em Minas Gerais (CBH, 2016a).

Ao longo da bacia estão instaladas cinco usinas com reservatórios (Camargos, Furnas, Mascarenhas de Moraes, Marimbondo e Água Vermelha) e sete usinas a fio d'água (Itutinga, Funil-Grande, L. C. Barreto, Jaguará, Igarapava, Volta Grande e Porto Colômbia) (ONS, 2016a).

O reservatório hidrelétrico objeto de estudo é o da UHE Furnas (Figura 5), localizado em Minas Gerais entre os municípios de São João Batista do Glória e São José da Barra (Latitude  $-20^{\circ}67'$  e Longitude  $-46^{\circ}32'$ ). A hidrelétrica foi construída no

rio Grande em 1958, começando a funcionar efetivamente em Passos, Minas Gerais, em 1963. Possui volume útil de 17,217 bilhões de m<sup>3</sup>, extensão máxima de 220 Km, 1.440 Km<sup>2</sup> de área inundada e capacidade instalada de 1.216 MW (FURNAS, 2016).

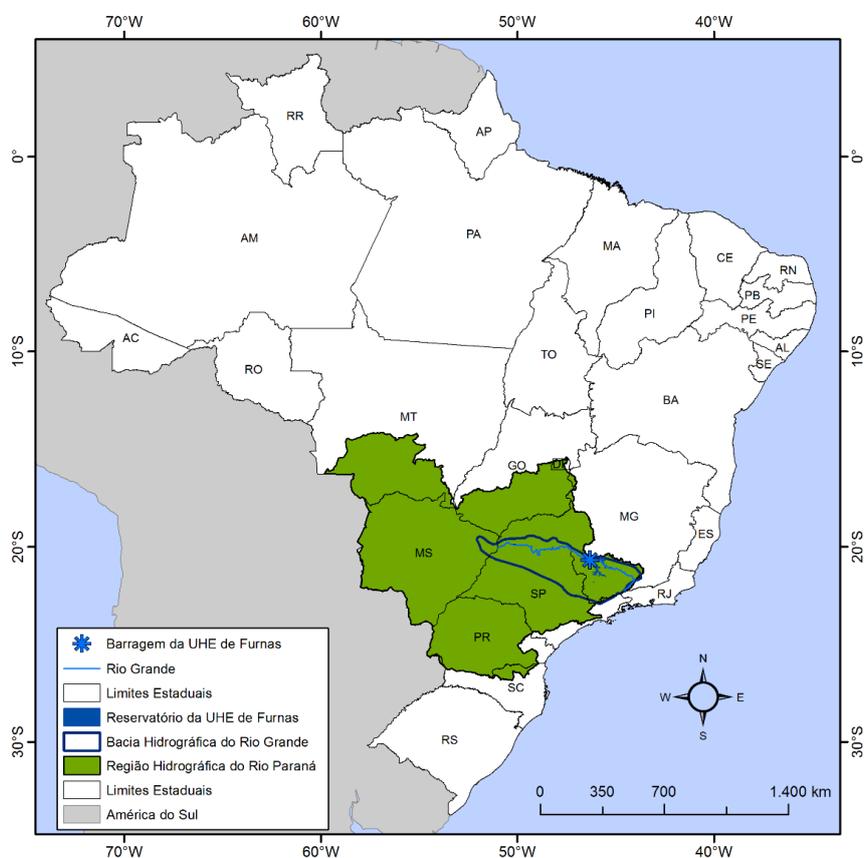


Figura 5 - Delimitação da área de estudo

O clima tropical de altitude é o predominante na Região, caracterizado por chuvas no verão e seca no inverno, além de temperaturas amenas e com poucas variações. As temperaturas médias anuais oscilam entre 21 e 23°C, sendo o verão e a primavera os períodos mais quentes (máximas diárias entre 28 à 30°C) (CBH, 2016b).

### **3.2 Softwares utilizados**

A Ferramenta de Avaliação do Solo e Água (SWAT) integrada a um Sistema de Informação Geográfica (SIG) foi utilizada na simulação da vazão ao reservatório da UHE Furnas, na bacia do Rio Grande. Na modelagem foram adotados os seguintes programas: ArcGIS, versão 10.3, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas de Sistemas Ambientais dos Estados Unidos (*Environmental Systems Research Institute - ESRI*); SWAT 2012 e o ArcSWAT versão 2012.10.3.18 desenvolvido pelo Serviço de Pesquisa Agrícola e a Universidade A&M do Texas; e SWAT-CUP 2012, versão 5.1.6.

### **3.3 Dados de entrada e configuração do modelo**

A modelagem seguiu as etapas: parametrização dos dados de entrada; configuração do modelo; aquecimento e simulação; análise de sensibilidade; calibração e validação através de testes estatísticos. Os dados necessários para desenvolver o modelo são o Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDE), propriedades do solo, dados de uso do solo e dados meteorológicos como precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade, velocidade do vento e radiação solar.

O MDE (escala 1:300.000), o mapa de solo e o mapa de uso e cobertura do solo foram obtidos através do Instituto de Pesquisas Sócio Ambientais da UFG (IESA, 2015). O modelo SWAT utiliza os mapas de altimetria e declividade para dividir a bacia hidrográfica em áreas menores (sub-bacias), motivo pelo qual o *software* consegue modelar grandes bacias e obter resultados satisfatórios. O MDE e o mapa de declividade são apresentados nas Figuras 6 e 7.

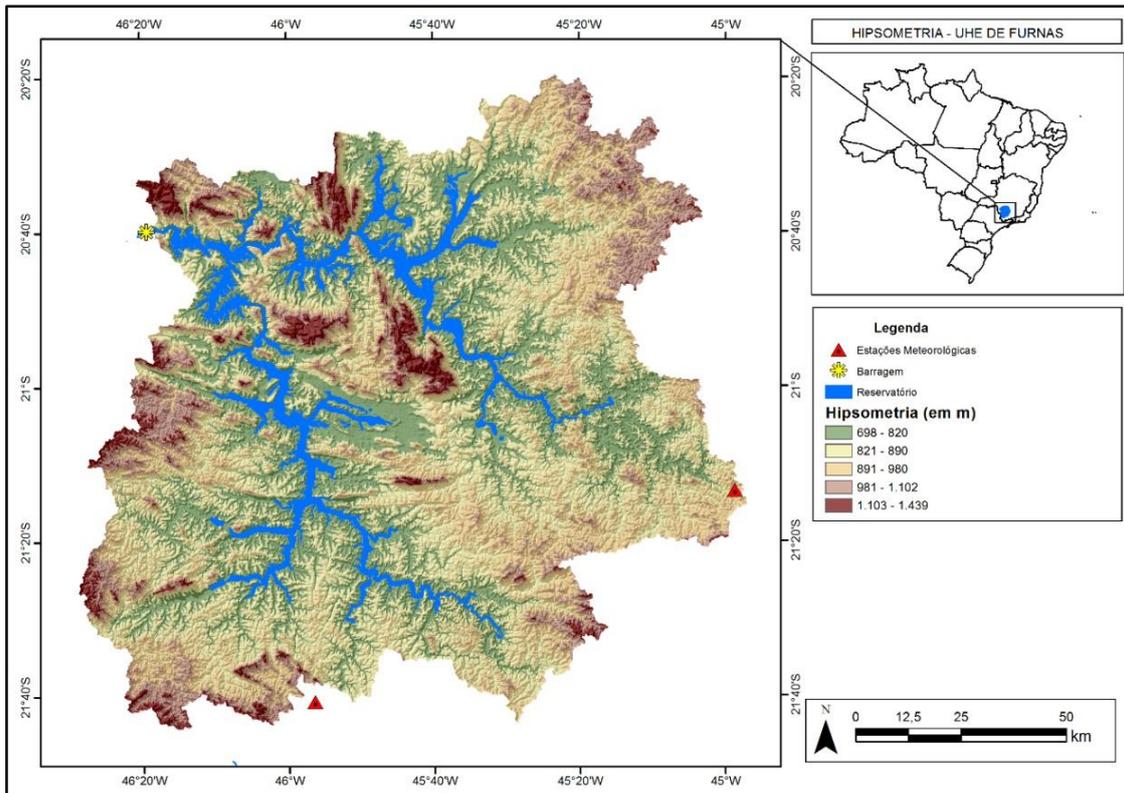


Figura 6 - Modelo Digital de Elevação  
Fonte: IESA (2015)

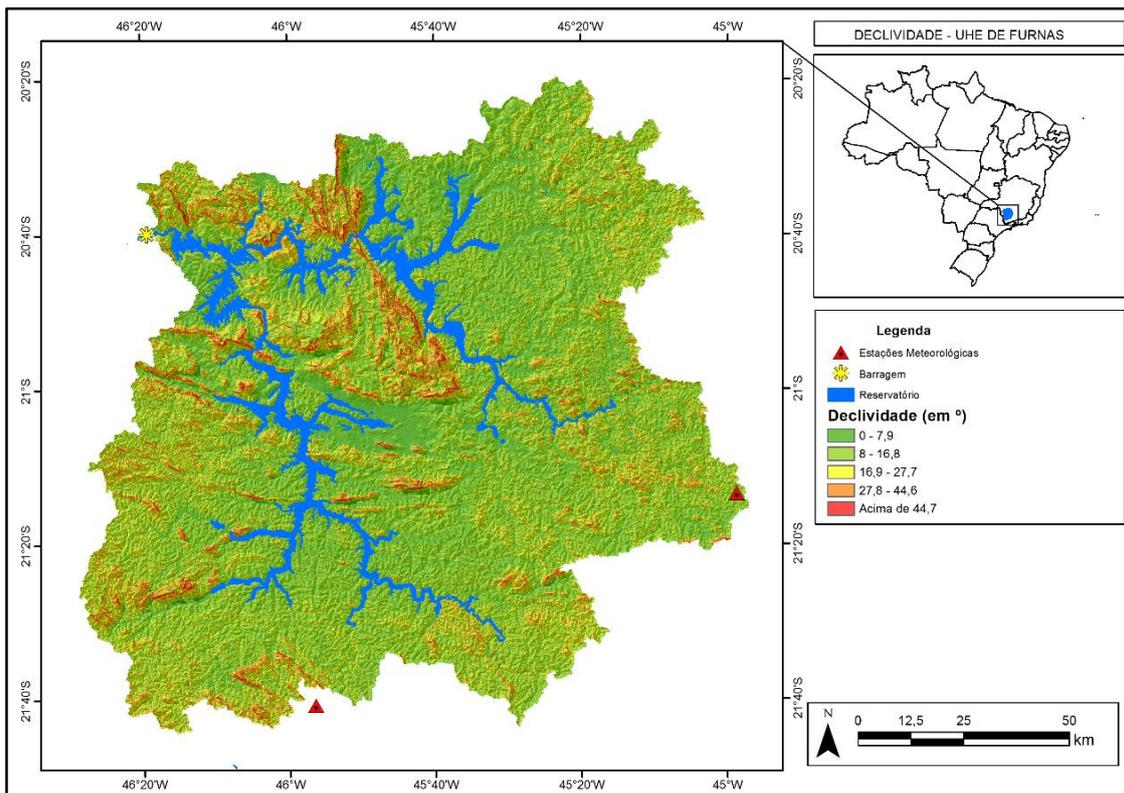


Figura 7 - Mapa de declividade  
Fonte: IESA (2015)

Conforme a Figura 6, na área em estudo (área de drenagem do Reservatório da UHE Furnas) predomina a altura entre 698 a 820 metros. A região com maior altimetria alcança 1.439 metros. O número de sub-bacias a ser definido a partir destas informações varia de acordo com o limite de área definida para o acúmulo e direção do fluxo.

Os tipos de solo, o uso e a cobertura do solo e a declividade são utilizados na divisão das sub-bacias em Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's). A inclusão das informações referentes às características de cada categoria pedológica é importante na modelagem, principalmente, para a estimativa da capacidade de infiltração (Figura 8).

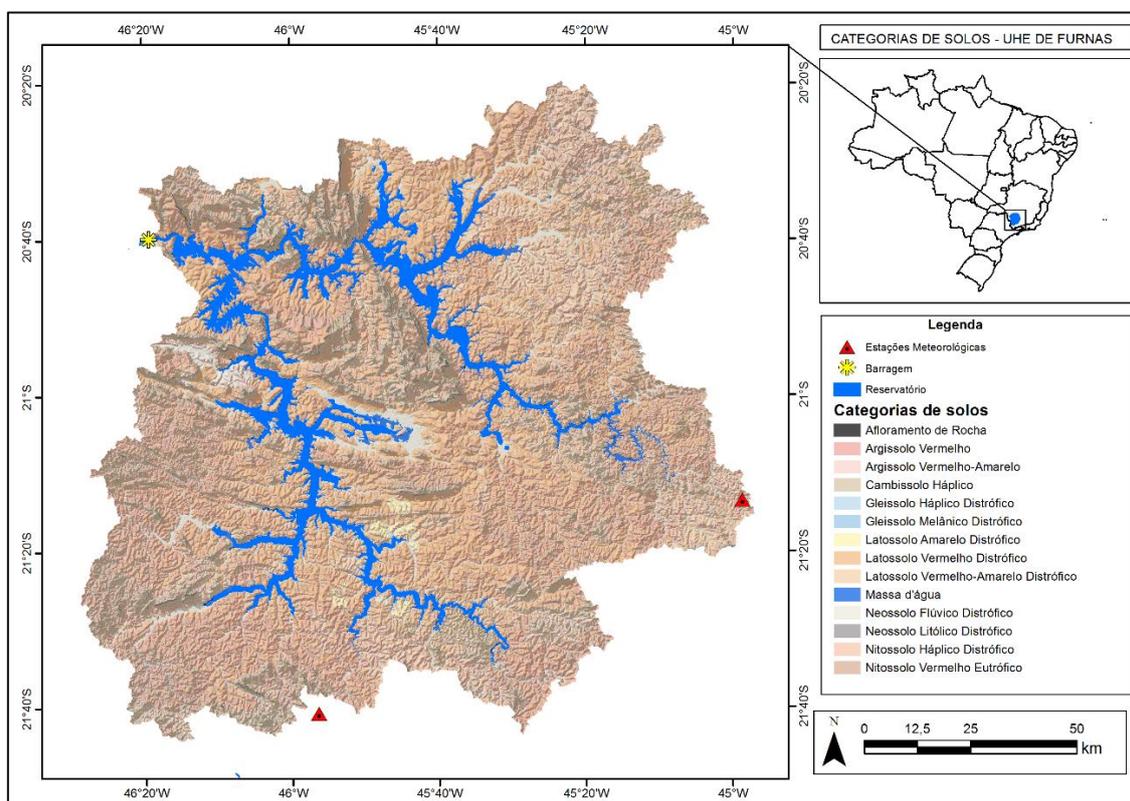


Figura 8 - Categorias de solos  
Fonte: IESA (2015)

Predominam na bacia os tipos de solo Latossolo Vermelho distrófico (32,5%), Argissolo Vermelho distrófico (19,80%) e Cambissolo Háptico distrófico (18,96%). Seguidos por: Neossolo Flúvico distrófico (6,82%); Latossolo Vermelho-Amarelo

distrófico (5,71%); Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico (3,09%); Gleissolo Háptico distrófico (2,66%); Neossolo Litólico distrófico (0,98%); Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (0,88%); Nitossolo Háptico distrófico (0,60%); Latossolo Amarelo distrófico (0,39%); Argissolo Vermelho eutrófico (0,13%); Nitossolo Vermelho eutrófico (0,12%); Cambissolo Háptico eutrófico (0,08%); Afloramento de rocha (0,04%); e Gleissolo Melânico distrófico (0,01%).

As categorias de solo predominantes apresentam como características:

- Latossolo Vermelho – alta taxa de infiltração, alto grau de resistência e tolerância à erosão e baixo potencial de escoamento superficial;
- Argissolo Vermelho – moderada taxa de infiltração, moderada resistência e tolerância a erosão e potencial de escoamento superficial moderado;
- Cambissolo Háptico – baixa taxa de infiltração, baixa resistência à erosão e alto potencial de escoamento superficial.

Para realizar as simulações hidrológicas o modelo precisa de informações sobre as características físicas dos solos como: tipo do solo (SNAME); número de camadas no perfil do solo (NLAYERS); grupo hidrológico do solo (HYDGRP); profundidade das raízes (SOL\_ZMX); porosidade dos solos em que ânions são excluídos (ANION\_EXCL); selamento superficial (SOL\_CRK); textura; profundidade do solo (SOL\_Z); densidade do solo (SOL\_BD); capacidade de armazenamento de água (SOL\_AWC); carbono orgânico (SOL\_CBN); condutividade hidráulica do solo saturado (SOL\_K); percentual de argila (CLAY); percentual de silte (SILT); percentual de areia (SAND); percentual de pedra (ROCK); albedo do solo úmido (SOL\_ALB); fator de erodibilidade do solo (USLE\_K); e a condutividade elétrica (SOL\_EC).

As informações sobre as características físicas do solo foram obtidas na literatura, em Baldissera (2005) e Rosa (2016), por não haver dados disponíveis

diretamente para a área em estudo. Na literatura não havia informações sobre a classe Nitossolo, assim, foram incluídas as características do Argissolo Vermelho-Amarelo, classes que possuem certa correspondência de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). O grupo hidrológico do solo foi incluído conforme Sartori (2004) e Sartori *et al.* (2005).

Na modelagem hidrológica também foi utilizado o mapa de uso e cobertura do solo, que compõe oito classes com predominância da classe Florestal (Figura 9).

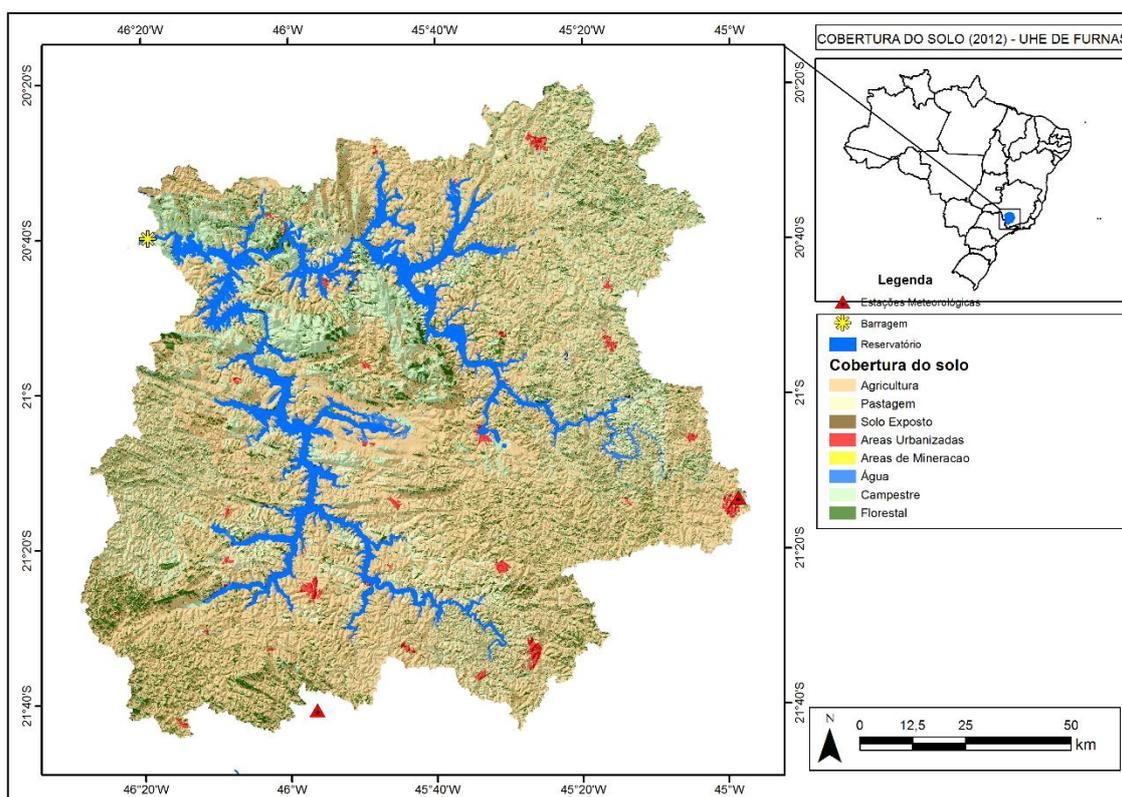


Figura 9 - Mapa de uso e cobertura do solo  
Fonte: IESA (2015)

Na região, a área de uso e cobertura do solo está distribuída em Floresta (38,58%), Solo exposto (15,83%), Agricultura (14,42%), Pastagem (12,87%), Formação campestre (11,07%) e Água (7,23%). Cada tipo de uso e cobertura do solo foi associado

às informações existentes no banco de dados do SWAT (Quadro 2), sendo assim utilizadas as características padrão do modelo.

<b>Cobertura e uso do solo na Bacia</b>	<b>Banco de dados SWAT</b>
Floresta	Forest ever green (FRSE)
Solo exposto	Rock outcrop
Agricultura	Agricultural land generic (AGRL)
Pastagem	Pasture (PAST)
Formação campestre	Range grasses (RNGE)
Água	Water (WATR)

Quadro 2 - Analogia entre o uso do solo na bacia e o banco de dados SWAT

A série histórica dos dados climáticos utilizada para realizar a simulação hidrológica na bacia do rio Grande compreende o período de 16 anos (01/01/1998 à 31/12/2013). As informações foram extraídas do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2016). As estações selecionadas foram Lavras (latitude  $-21^{\circ}75'$ , longitude  $-45^{\circ}00'$ , Altitude 918,84 metros, código 83687) e Machado (latitude  $-21^{\circ}66'$ , longitude  $-45^{\circ}91'$ , Altitude 873,35, código 83683), com localizações já apresentadas na Figura 9.

As simulações hidrológicas requerem períodos longos de análise, geralmente 30 anos (SCHAEFLI, 2015). No Brasil, existem limitações na disponibilidade dos dados. Na bacia do Rio Grande, o número de estações climáticas do INMET é pequeno, a série histórica é reduzida e apresenta falhas de até um ano. A estação climática Machado está sem dados disponíveis para precipitação e temperatura durante todo o ano de 1986 a 1990, e os anos de 1994 e 1997 apresentam falhas de 2 e 6 meses, respectivamente. Já na estação de Lavras, em termos de falhas anuais de precipitação, destacam-se os anos 1986, 1987, 1990 e 1992.

O SWAT possui um gerador climático em que as falhas nas séries históricas dos dados podem ser substituídas por -99 e as variáveis climáticas faltantes podem ser simuladas pelo modelo (NEITSH *et al.*, 2011). Neste trabalho, utilizou-se o gerador climático para o preenchimento de falhas e para a simulação da radiação solar. O Gerador Climático gera os dados faltantes e preenche as falhas através de informações mensais como: precipitação média (PCPMM); desvio padrão para precipitação diária (PCPSTD); coeficiente de assimetria para precipitação (PCPSKW); probabilidade de um dia úmido ocorrer após um dia seco (PR\_W1); a probabilidade de um dia úmido ocorrer após um dia úmido (PR\_W2); número médio de dias com chuva no mês (PCPD); precipitação máxima de meia hora (RAINHHMX); período de retorno (RAIN\_YRS); média da temperatura máxima do ar (TMPMX); média da temperatura mínima do ar (TMPMN); desvio padrão da temperatura máxima do ar (TMPSTDMX); desvio padrão da temperatura mínima do ar (TMPSTDMN); radiação solar (SOLARAV); temperatura média do ponto de orvalho (DEWPT); e velocidade média do vento (WNDV). Estes valores foram calculados conforme Arnold (2012) e Allen *et al.* (2006).

Os dados de vazão correspondentes à estação fluviométrica 19004 da Agência Nacional das Águas (ANA) foram utilizados durante a etapa de calibração (2000-2010) e validação (2011-2013) do modelo. Os dados diários obtidos (ANA, 2016b) foram convertidos em vazão média mensal e comparados com a vazão média mensal simulada pelo modelo SWAT.

Os limites da bacia, sub-bacias e da rede de fluxo foram definidos através de informações do Modelo Digital de Elevação do Terreno. A partir dos mapas de uso e cobertura do solo, propriedades do solo e declividade foram definidas as HRU's. Na modelagem a divisão da bacia aumenta a precisão e a descrição física do equilíbrio

hídrico, pois em uma bacia podem haver diferentes usos do solo, além de diferentes propriedades do solo (NEITSCH *et al.*, 2011). Assim, o escoamento é separado para cada HRU e depois somado em um valor total de escoamento para a bacia hidrográfica.

Para a obtenção das HRU's foi adotado um *threshold* de 20% para uso do solo, 10% para tipo de solo e 20% para declividade. O que permite a exclusão de áreas de uso do solo, tipos de solo e declividade muito pequenas. Definindo um limite de 20% para uso do solo, as HRU's que ocupam menos de 20% na área da sub-bacia serão eliminadas, controlando assim o número de HRU's a serem simuladas.

### **3.4 Período de aquecimento e simulação**

A série histórica de dados meteorológicos adotada para o estudo compreende 16 anos (01/01/1998 à 31/12/2013). Os dois primeiros anos do modelo foram descartados, servindo para a fase de aquecimento (*warm up*), levando em consideração que pelo menos um ano é requerido para que as variáveis em estudo estejam livres de condições iniciais, como as incertezas referentes à umidade (ARNOLD *et al.*, 2012). Assim, o período de simulação foi de janeiro de 2000 a dezembro de 2013.

### **3.5 Análise de sensibilidade**

Os parâmetros mais sensíveis do modelo foram determinados utilizando o SWAT-CUP, que emprega o método *LH-OAT (Latin Hypercube and Sampling One-Factor-at-a-Time)* (VAN GRIENSVEN *et al.*, 2006). Na análise de sensibilidade foram utilizados os dados de vazão média mensal observada correspondente ao período de 01/01/2000 à 31/12/2010. A literatura foi utilizada para identificar os principais parâmetros ligados aos processos hidrológicos a serem incluídos na análise de

sensibilidade, bem como os limites iniciais desses parâmetros (VAN GRIENSVEN *et al.*, 2006).

Além de definir os limites iniciais de variação dos parâmetros, é necessário estabelecer o método de variação: adição (adição de um valor constante ao valor inicial); multiplicação (variação do valor inicial por porcentagem); e substituição direta (alteração do valor diretamente). No Quadro 3 são apresentados os parâmetros de maior sensibilidade no SWAT, em termos de modelagem de vazão, segundo a literatura.

<b>Parâmetro</b>	<b>Definição</b>
ALFA_BF	Fator alfa de recessão do fluxo de base (dias)
BIOMIX	Eficiência do revolvimento biológico
BLAI	Índice do potencial máximo de área foliar
CANMX	Armazenamento máximo do dossel (mm H <sub>2</sub> O)
CH_K	Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm h <sup>-1</sup> )
CH_N	Coeficiente de rugosidade de <i>Manning</i>
CN2	Curva-número
EPCO	Fator de compensação de crescimento da planta
ESCO	Fator de compensação da evaporação do solo
GW_DELAY	Tempo de retardo de água subterrânea (dias)
GW_REVAP	Coeficiente de escoamento subterrâneo
GWQMN	Limite entre a profundidade de água no aquífero raso e a superfície (mm)
RCHRG_DP	Fração da percolação aquífero profundo
REVAPMN	Profundidade de água limite em aquífero raso para que ocorra escoamento subterrâneo (mm H <sub>2</sub> O)
SLOPE	Declividade média (m m <sup>-1</sup> )
SLSUBBSN	Comprimento médio do declive-rampa lateral (m)
SOL_ALB	Albedo de solo úmido
SOL_AWC	Capacidade de água disponível (mm mm <sup>-1</sup> solo)
SOL_K	Condutividade hidráulica (mm h <sup>-1</sup> )
SOL_Z	Profundidade da camada do solo
SURLAG	Coeficiente de retardo de escoamento superficial
SFTMP	Temperatura de queda de neve (°C)

Continuação...

<b>Parâmetro</b>	<b>Definição</b>
SMFMN	Taxa mínima de derretimento de neve durante o ano ( $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ )
SMFMX	Taxa máxima de derretimento de neve durante o ano ( $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ )
SMTMP	Temperatura base de derretimento de neve ( $^\circ\text{C}$ )
TIMP	Fator de retardo da temperatura do bloco de neve
TLAPS	Taxa de lapso da temperatura ( $^\circ\text{C Km}^{-1}$ )

Quadro 3 - Parâmetros de maior sensibilidade no SWAT (para vazão)

Fonte: Adaptado de Arnold *et al.* (2012), Lelis *et al.* (2012) e Van Griensven *et al.* (2006)

No processo de análise de sensibilidade foram seguidas as orientações gerais do protocolo de calibração para modelos distribuídos proposto por Abbaspour *et al.* (2015), e também discutido em Rouholahnejad *et al.* (2012), Arnold *et al.* (2012) e em Abbaspour *et al.* (2007).

Os parâmetros relacionados à neve e à variação de temperatura (SFTMP, SMFMN, SMFMX, SMTMP, TIMP e TLAPS) não foram incluídos no processo de calibração. Estes parâmetros não corresponderem a parâmetros hidrológicos consideráveis para a bacia em estudo. A declividade (SLOPE) e a profundidade do solo (Sol\_Z) também não foram incluídas no processo de calibração, para não alterar as condições geomorfológicas da bacia (FUKUNAGA, 2012; ROSA, 2016).

### 3.6 Calibração e validação

O *software* SWAT-CUP e o algoritmo SUFI-2 também foram utilizados na calibração e análise de incerteza, para o período de 2000-2010. Através de processos iterativos o algoritmo tenta capturar parte dos dados medidos dentro de 95% de incerteza de predição (95PPU), realizando o mapeamento de todas as incertezas, como

modelo conceitual, dados de entrada e parâmetros hidrológicos (ABBASPOUR *et al.*, 2015).

Dois índices foram utilizados na avaliação da força da calibração e da validação. O P-fator fornece uma medida da capacidade do modelo para capturar incertezas e R-fator é a medida da qualidade da calibração e indica a espessura do 95PPU (ROUHOLAHNEJAD *et al.*, 2012). Deve haver um equilíbrio entre os dois índices (ABBASPOUR *et al.*, 2015).

Para previsões confiáveis, os resultados do modelo foram submetidos ao processo de calibração semi-automática com base nos resultados da análise de sensibilidade. Como função objetivo foi utilizado o coeficiente *Nash e Sutcliffe* (NSE). Para avaliar o desempenho do modelo em relação aos valores de referência foram utilizados o coeficiente de eficiência NSE (GUPTA *et al.*, 1999; NASH; SUTCLIFFE, 1970), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o percentual de tendências (PBIAS).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a simulação da vazão na área de drenagem do reservatório da UHE Furnas, bacia hidrográfica do rio Grande. Também é apresentada uma breve análise descritiva dos dados de vazão no período sob análise.

### 4.1 Análise da série histórica de vazão

Uma análise prévia dos dados de vazão foi realizada antes do processo de simulação e calibração do modelo. Os dados de vazão são correspondentes a estação fluviométrica 19004 da Agência Nacional das Águas (ANA), localizada no exutório da bacia do rio Grande, na área de drenagem do reservatório da UHE Furnas.

A estatística descritiva dos dados é apresentada na Tabela 5. A vazão mínima registrada foi de  $101 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (em 2014) e a vazão máxima registrada foi de  $3.282 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (em 2007). A vazão média no período de 2000-2015 foi de  $772,20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , com um desvio padrão de  $561,27 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  e com coeficiente de variação de 72,69%, indicando alta variabilidade na vazão.

Tabela 5 - Estatística descritiva dos dados de vazão afluente ao reservatório da UHE Furnas (2000-2015)

<b>Medida descritiva</b>	<b>Valor</b>	<b>Medida descritiva</b>	<b>Valor</b>
Mínimo ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	101,10	Amplitude ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	3.181,01
1º Quartil ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	379,70	Desvio padrão ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	561,27
Mediana ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	582,00	Coeficiente de variação (%)	72,69
Média ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	772,20	Assimetria	1,67
3º Quartil ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	999,30	Curtose	3,03
Máximo ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	3.282,00		

Agrupando os dados mensalmente (Figura 10), percebe-se maior variabilidade da vazão em janeiro, fevereiro, março e dezembro. A menor variabilidade ocorre de abril a novembro, meses do ano com menor vazão. Alguns *outliers* são observados nos meses de abril, setembro e outubro.

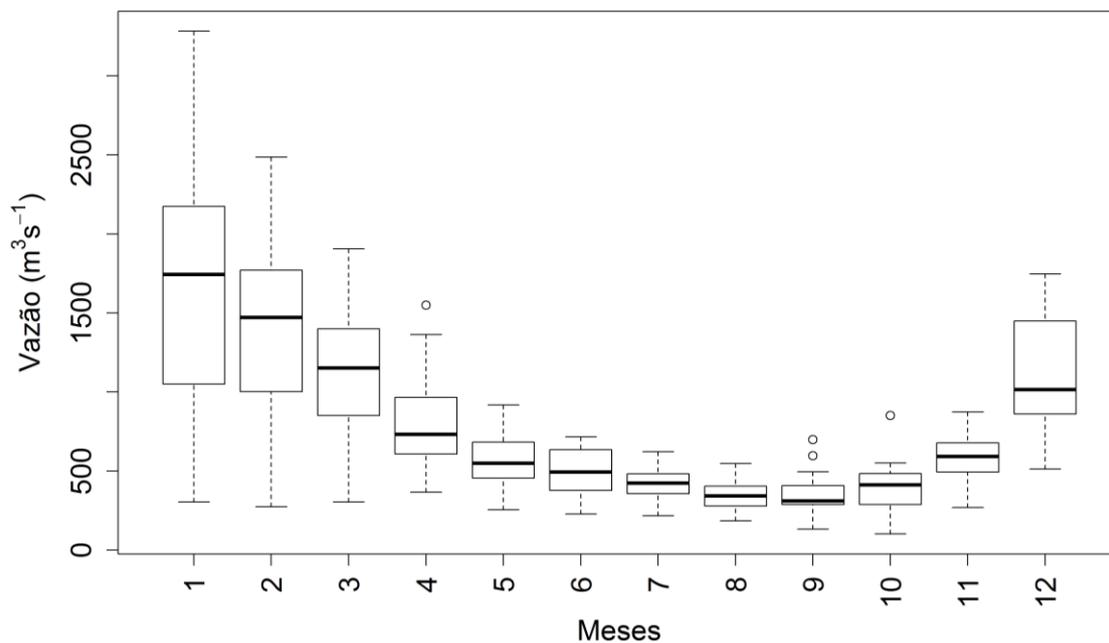


Figura 10 - *Boxplot* da vazão média mensal afluyente ao reservatório da UHE Furnas (2000 - 2015)

Ao analisar o comportamento da série histórica de vazão média mensal (Figura 11), observa-se a existência de sazonalidade resultando em picos de vazão. Esta sazonalidade está relacionada aos eventos de chuva.

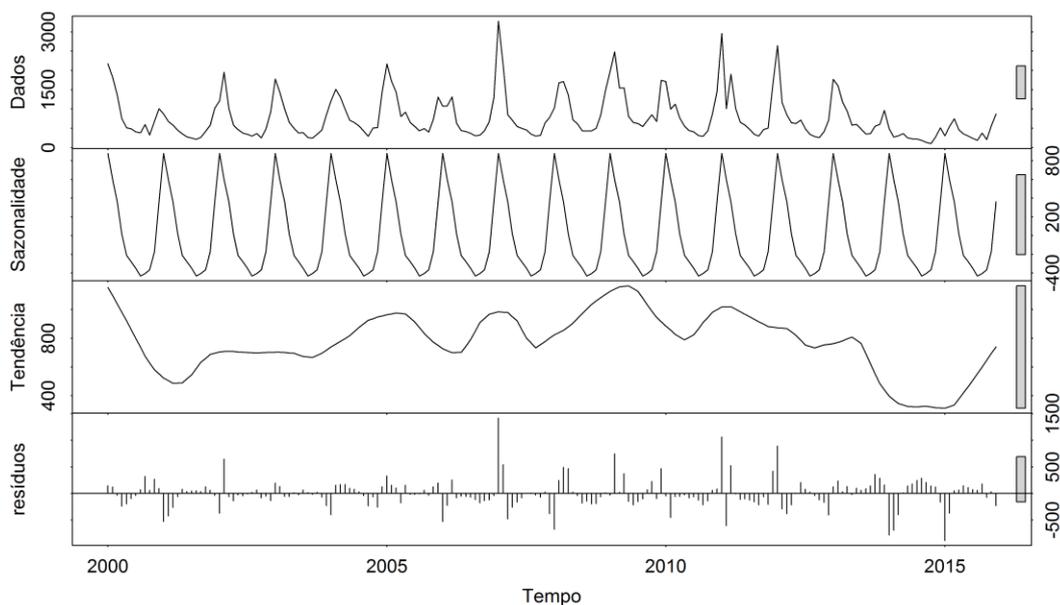


Figura 11 - Decomposição da série histórica de vazão média mensal observada na estação 19004 (ANA), correspondente ao período de 2000 a 2015.

Os dados possuem um comportamento sazonal e idêntico em toda a série histórica. Com relação ao comportamento das tendências de vazão, observa-se: 2000 a 2001 tendência de redução; 2002 a 2009 tendência de aumentar; e 2010 a 2015 tendência de diminuir o fluxo. A ocorrência de oscilações periódicas ao longo dos anos foi aleatória, conforme apresenta os resíduos.

A redução da vazão pode estar relacionada aos eventos de chuva, porém outros fatores podem estar interferindo nesta redução, como uso e cobertura do solo e irrigação agrícola a montante. Através da decomposição da série histórica de vazão foi possível identificar uma tendência de redução a partir de 2010. Essa mesma tendência não ficou claramente definida na análise da série histórica de precipitação (Figura 12).

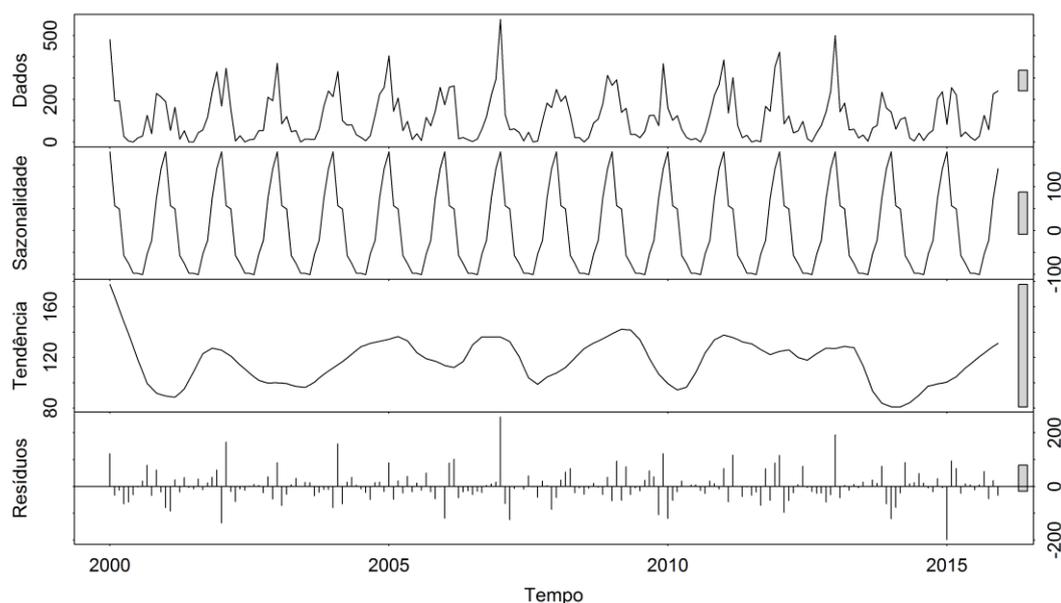


Figura 12 - Decomposição da série histórica de precipitação na área de drenagem do reservatório da UHE Furnas, correspondente às estações de Lavras e Machado, no período de 2000 a 2015.

## 4.2 Simulação da vazão

Com o delineamento da área de drenagem do reservatório da UHE Furnas foram geradas 41 sub-bacias, através do Modelo Digital de Elevação do Terreno. Adotou-se o limite de área determinado pelo modelo para a formação da direção e acumulação de fluxo. Pela combinação das informações de tipos de solo, uso e cobertura do solo e declividade foram geradas 290 Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's). Na Figura 13 é apresentada parte do relatório gerado pelo modelo. O relatório apresenta a área total de cada sub-bacia, bem como a área da classe de solo, uso e cobertura do solo e declividade referente a cada HRU.

HRULandUseSoilsReport.txt - Bloco de notas					
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda					
SWAT model simulation Date: 2/5/2017 12:00:00 AM Time: 00:00:00					
MULTIPLE HRUs LandUse/Soil/Slope OPTION THRESHOLDS : 20 / 10 / 20 [%]					
Number of HRUs: 290					
Number of Subbasins: 41					
		Area [ha]	Area[acres]		
Watershed		1552291.2900	3835789.3922		
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area	
LANDUSE:					
Agricultural Land-Close-grown --> AGRC		109238.7604	269934.4389	7.04	
Forest-Evergreen --> FRSE		1320655.2581	3263405.1756	85.08	
Water --> WATR		39719.7381	98149.4587	2.56	
Range-Grasses --> RNGE		45982.8810	113625.9982	2.96	
Agricultural Land-Generic --> AGRL		36694.6524	90674.3208	2.36	
SOILS:					
LVAD		76742.4245	189634.3680	4.94	
LVD		600921.3170	1484906.6204	38.71	
PVD		377663.6040	933225.6488	24.33	
CXD		388964.5126	961150.7589	25.06	
RYD		48274.4773	119288.6471	3.11	
WATER		39719.7381	98149.4587	2.56	
PVAE		14165.7260	35004.2173	0.91	
LAD		744.0874	1838.6773	0.05	
NXD		5095.4031	12590.9957	0.33	
SLOPE:					
0-8		399784.3568	987887.1348	25.75	
8-20		825219.1512	2039157.7836	53.16	
20-9999		327287.7820	808744.4737	21.08	

Figura 13 - Relatório final de Unidades de Resposta Hidrológica criadas pelo modelo SWAT para a bacia do Rio Grande, na área de drenagem do reservatório da UHE Furnas.

Após a inclusão dos parâmetros climáticos a simulação hidrológica foi realizada para 16 anos (01/01/1998 a 31/12/2013), considerando os dois primeiros anos como *warm up* (ARNOLD *et al.*, 2012). Os resultados obtidos pelo modelo foram comparados com a vazão média mensal observada na estação fluviométrica 19004 da ANA. Na Figura 14 é apresentado o hidrograma da vazão simulada no exutório da bacia (reservatório da UHE Furnas) e a vazão observada.

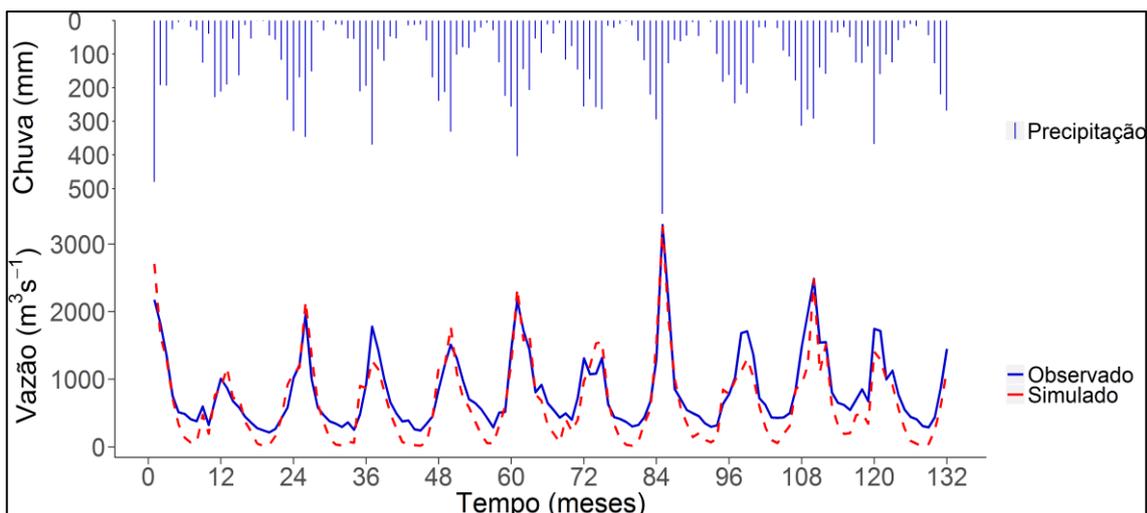


Figura 14 - Hidrograma da vazão média mensal simulada pelo modelo SWAT e a vazão observada na estação 19004 (ANA), correspondente ao período de 2000 a 2010.

Observa-se que o modelo subestima a vazão, em períodos de recessão ao longo dos anos analisados, e superestima alguns picos de vazão em períodos com maior volume de precipitação. De forma geral, os picos de vazão são melhor representados pelo modelo em relação às vazões mínimas.

Na simulação inicial (sem ajuste nos parâmetros hidrológicos), os resultados das estatísticas quantitativas foram considerados aceitáveis, conforme a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007). Os valores do coeficiente *Nash-Sutcliffe efficiency* (NSE) e do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) podem ser classificados como muito bons, 0,76 e 0,88, respectivamente. Contudo existe a tendência média dos dados simulados serem menores em cerca de 18,7% do que as observações, sendo que valores positivos do PBIAS indicam uma subestimativa do modelo. A média da vazão simulada nesse período correspondeu a  $669,77 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  e a média da vazão observada foi correspondente a  $824,02 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

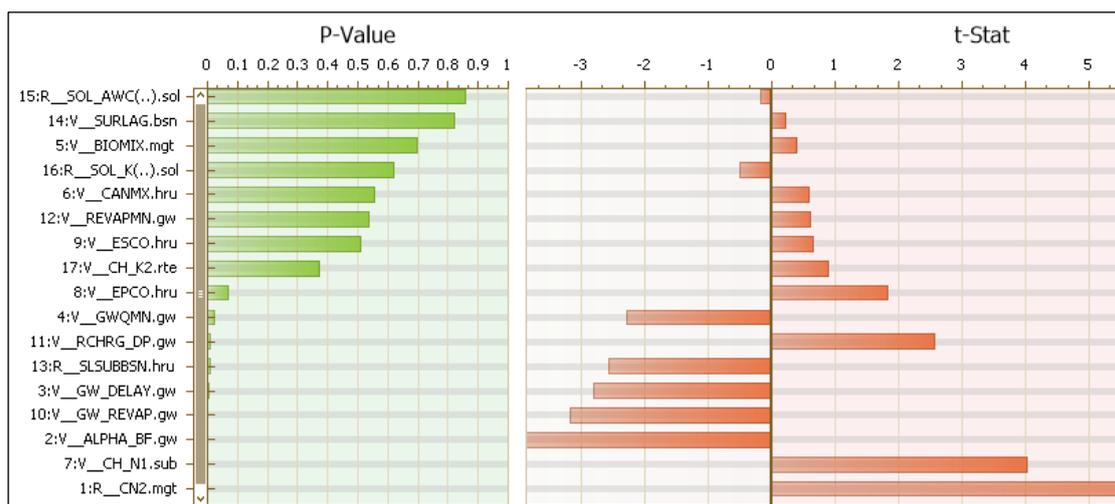
No entanto, foi realizada a análise de sensibilidade para identificar os parâmetros hidrológicos que mais interferem nos resultados do modelo. Estes parâmetros foram

utilizados no processo de calibração, em busca de melhores resultados. Os processos de análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incertezas foram realizados com o *software* SWAT-CUP e o algoritmo de otimização SUFI-2.

Apesar da disponibilidade de dados climáticos e fluviométricos dos anos de 2014 e 2015, este período não foi incluso no processo de calibração e validação, em função da tendência já indicada na Figura 11.

### 4.3 Análise de sensibilidade

Os parâmetros mais sensíveis foram obtidos a partir da análise de sensibilidade global, e os resultados foram avaliados em função dos valores de *p-value* e *t-Stat*. Os resultados da análise de sensibilidade com o algoritmo SUFI-2 são mostrados na Figura 15.



Nota: Tipo de alteração realizada em cada parâmetro: “V” substituição; “A” adição; e “R” multiplicação

Figura 15 - Resultado da análise de sensibilidade dos parâmetros hidrológicos

Os menores valores de *p-value* e os maiores valores de *t-Stat* indicam maior sensibilidade do parâmetro hidrológico. Quanto maior o valor absoluto do *t-Stat* mais sensível é o parâmetro, indicando assim o grau de sensibilidade. Já o *p-value* determina

o grau de significância da sensibilidade dos parâmetros, quanto mais próximo de zero, maior a sua significância na modelagem (ABBASPOUR, 2015). Assim, observa-se que o CN2 apresentou maior sensibilidade. Os parâmetros identificados são importantes para a estimativa de vazão, na área de drenagem do reservatório, com o simulador hidrológico SWAT (Tabela 6).

Tabela 6 - Resultado da análise de sensibilidade global utilizando o SUFI-2

<b>Nome do Parâmetro</b>	<b><i>t-Stat</i></b>	<b><i>p-value</i></b>
SOL_AWC(..).sol	-0.17984	0.85747
SURLAG.bsn	0.22463	0.82252
BIOMIX.mgt	0.38710	0.69913
SOL_K(..).sol	-0.50031	0.61746
CANMX.hru	0.59088	0.55533
REVAPMN.gw	0.62086	0.53547
ESCO.hru	0.66450	0.50721
CH_K2.rte	0.89169	0.37374
EPCO.hru	1.83609	0.06798
GWQMN.gw	-2.27961	0.02379
RCHRG_DP.gw	2.56228	0.01121
SLSUBBSN.hru	-2.56703	0.01106
GW_DELAY.gw	-2.80554	0.00557
GW_REVAP.gw	-3.16755	0.00180
ALPHA_BF.gw	-3.86277	0.00016
CH_N1.sub	4.02983	0.00008
CN2.mgt	10.53769	0.00000

Os parâmetros mais sensíveis foram: valor inicial do Curva-Número (CN2); coeficiente de rugosidade (CH\_N1); constante de recessão do escoamento de base (ALPHA\_BF); coeficiente de escoamento subterrâneo (GW\_REVAP); tempo de retardo de água subterrânea (GW\_DELAY); comprimento da declividade média (SLSUBBSN); fração de água percolada para o aquífero profundo (RCHRG\_DP); limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície (GWQMN); e fator de compensação de água pelas plantas (EPCO).

O parâmetro CN2 está relacionado à quantidade de escoamento com base no tipo de solo, uso do solo e condições antecedentes de umidade. É um dos parâmetros mais utilizados na calibração de modelos hidrológicos, em processos de modelagem de escoamento superficial (ARNOLD *et al.*, 2012). Este parâmetro também foi considerado como o mais sensível nos estudos de Fernandes (2015), Ghobadi *et al.* (2015), Rosa (2016) e Salles (2012).

A importância dos parâmetros (sensibilidade) depende da variável sob análise, topografia, tipo de solo, além do tipo de uso e cobertura do solo, não devendo haver generalização (VAN GRIENSVEN *et al.*, 2006). O que pode ser verificado em dois estudos: Rosa (2016) realizou a modelagem hidrossedimentológica na bacia do Rio Pomba, em Minas Gerais, e identificou sete parâmetros como os mais sensíveis: CN2, SOL\_AWC, SURLAG, USLE\_P, SPCON, SPEXP, SOL\_K e SOL\_Z; e Pereira *et al.* (2016) também realizaram calibração e validação de modelagem hidrológica na bacia do Rio Pomba e encontraram como parâmetros mais sensíveis do modelo: CN2, SOL\_AWC, SOL\_Z, SOL\_K, ESCO, ALPHA\_BF e CH\_N2.

Arnold *et al.* (2012), a partir de uma análise na literatura, relacionaram os parâmetros mais utilizados na calibração de processos de escoamento superficial e fluxo base: CN2, SOL\_AWC, ESCO, EPCO, SURLAG, GW\_ALPHA, GW\_REVAP, GW\_DELAY, GW\_QMN, REVAPMIN e RCHARG\_DP. Observa-se que os resultados gerados na análise de sensibilidade estão em consonância com o encontrado na literatura.

#### **4.4 Calibração e análise de incertezas**

Os parâmetros mais importantes para a simulação de vazão na bacia em estudo foram submetidos à etapa de calibração do modelo, no período correspondente a

01/01/2000 à 31/12/2010. Durante a calibração, os valores dos intervalos dos parâmetros são alterados até que sejam alcançados valores satisfatórios para a função objetivo ou para os parâmetros de avaliação do modelo (P-Fator e R-Fator) (ROUHOLAHNEJAD *et al.*, 2012).

Os parâmetros utilizados na calibração do modelo foram: valor inicial do SCS Curva-número para a condição de umidade II (CN2); coeficiente de rugosidade de Manning (CH\_N); constante de recessão do escoamento (ALPHA\_BF); coeficiente de escoamento subterrâneo (GW\_REVAP); tempo de retardo de água subterrânea (GW\_DELAY); comprimento da declividade média (SLSUBBSN); fração de água percolada para o aquífero profundo (RCHRG\_DP); limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície (GWQMN); e o fator de compensação de água pelas plantas (EPCO). Os valores dos parâmetros utilizados na calibração do modelo e o método de variação são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Principais parâmetros hidrológicos e os valores utilizados na calibração

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor mínimo (inicial)</b>	<b>Valor máximo (inicial)</b>	<b>Valor calibrado</b>	<b>Método de variação</b>
CN2	35	98	68,41	Multiplicação (%)
CH_N	0,01	0,5	0,23	Substituição
ALPHA_BF	0	1	0,04	Substituição
GW_REVAP	0,02	0,2	0,14	Substituição
GW_DELAY	30	300	77,92	Substituição
SLSUBBSN	10	150	31,87	Multiplicação (%)
RCHRG_DP	0	1	0,32	Substituição
GWQMN	0	5000	62,50	Soma
EPCO	0	1	0,88	Substituição

Os valores de CN2 foram aumentados em 68,41%, indicando que os valores iniciais utilizados na simulação não representam bem o valor de CN2 característico da área em estudo. Da mesma forma, o comprimento médio de inclinação (SLSUBBSN)

precisou ser alterado em cerca de 32%. Outros parâmetros tiveram seus valores substituídos conforme mostrado na Tabela 7.

A calibração do modelo depende de fatores como: entradas do modelo; pressupostos do modelador; estrutura; e algoritmo utilizado. Fazendo-se necessária análise de incertezas para avaliar a qualidade de ajuste do modelo calibrado. No SWAT-CUP a qualidade das medições está associada ao percentual dos dados na faixa de incerteza de predição de 95% (95PPU). Assim, são consideradas medições de alta qualidade aquelas em que mais de 80% dos dados medidos estão na faixa do 95PPU. Se apenas 50 % dos dados estão na faixa de incerteza de predição, o que caracteriza a existência de muitos *outliers*, as medições são consideradas de baixa qualidade (ABBASPOUR *et al.*, 2007; ABBASPOUR *et al.*, 2015).

Na Figura 16 é apresentada a vazão média mensal observada, a melhor simulação e a incerteza de predição (95PPU) para a estação de medição 19004, referente ao período de calibração 01/01/2000 a 31/12/2010.

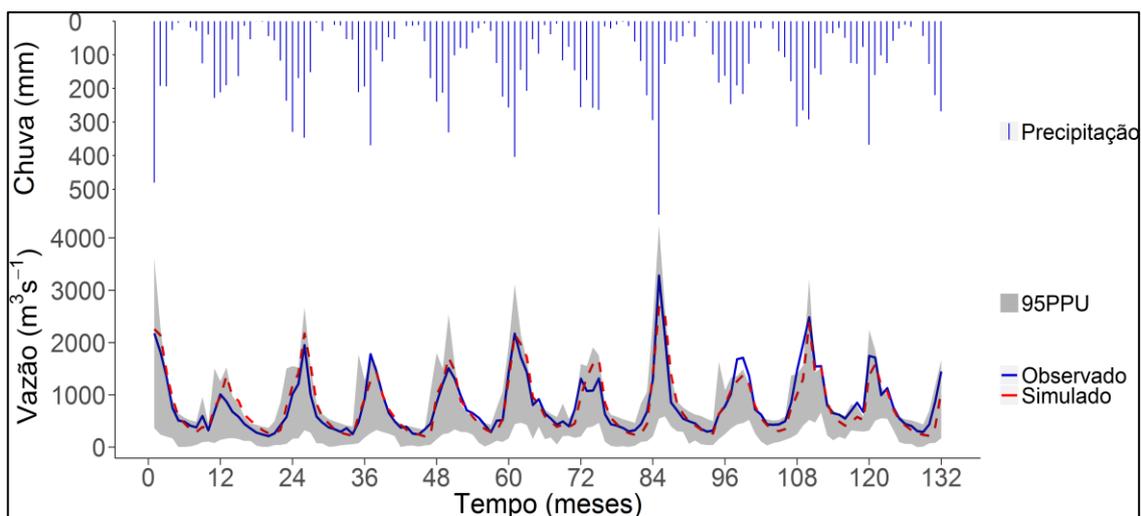


Figura 16 - Hidrograma para vazões médias mensais estimadas pelo SWAT e vazões médias mensais observadas na estação fluviométrica 19004 para o período de calibração (2000-2010).

Na calibração do fluxo (vazão), 94 % dos dados medidos foram incluídos na faixa de incerteza da predição (95PPU), havendo assim um erro do modelo de 6%. O modelo estimou de forma satisfatória a vazão na bacia do Rio Grande, com algumas dificuldades na obtenção de picos de vazão e pequenas alterações nas vazões mínimas.

Vale ressaltar que os parâmetros relacionados ao uso do solo foram incluídos a partir de valores disponíveis do banco de dados SWAT, o que pode estar interferindo no ajuste do modelo, em relação ao fluxo base. Assim como os parâmetros de tipos de solo foram adotados da literatura e não correspondem a dados de campo.

De forma geral, o modelo apresenta boa correlação entre os dados de precipitação e vazão, conforme apresentado no hidrograma (Figura 16). Os maiores eventos de precipitação são refletidos em picos de vazão e a vazão de base também é bem representada quando o volume pluviométrico diminui.

A calibração melhorou o ajuste do fluxo de base, em relação à simulação inicial. A vazão mínima observada correspondeu a  $213 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , ocorrida no ano de 2001, período de crise energética no Brasil. Para este mesmo período, a vazão mínima simulada correspondeu a  $15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . A eficiência do ajuste dos picos não foi significativa, os picos são subestimados ou superestimados ao longo dos anos, correspondendo a  $3.282 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  para vazão observada e  $3.267 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  para vazão simulada. Para o período de calibração a média da vazão observada foi de  $824 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  e a média da vazão simulada foi  $814 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Na Tabela 8 são apresentados os valores dos coeficientes estatísticos utilizados na avaliação da qualidade da calibração, obtidos pela comparação entre a vazão média mensal no exutório da bacia e a vazão observada no período de 01/01/2000 a 31/12/2010.

Tabela 8 - Valores dos coeficientes estatísticos  
(Calibração 2000-2010)

<b>Estatística de precisão</b>	<b>Resultado para vazão</b>	<b>Classificação</b>
NSE	0,86	Muito bom
R <sup>2</sup>	0,87	Muito bom
PBIAS (%)	1,10	Muito bom

A análise dos resultados (Tabela 8) mostra que os valores positivos de PBIAS indicam a tendência do modelo em subestimar a vazão em 1,10% e os valores de NSE de 0,86 e R<sup>2</sup> de 0,87 sugerem que o modelo é apropriado para a simulação de vazão conforme a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007).

Para Abbaspour *et al.* (2015) a comparação de resultados de modelagem hidrológica utilizando o SWAT com outros estudos deve ser realizada com cautela, pois a alteração das entradas utilizadas no modelo (exemplo: dados climáticos, mapa de uso do solo e parâmetros) resultaria em saídas diferentes.

Rosa (2016) ao calibrar o modelo encontrou valores de NSE de 0,77, R<sup>2</sup> de 0,79 e PBIAS de 0,03%, caracterizando o modelo como muito bom, porém com uma pequena tendência de subestimar a vazão na bacia do Rio Pomba (MG). O autor atribui as dificuldades na obtenção de bom ajuste no processo de calibração à qualidade dos dados de entrada requeridos pelo modelo (dados de campo), que muitas vezes não estão disponíveis, sendo necessário adotar informações encontradas na literatura ou utilizar informações de *default* do modelo.

Castro (2013) avaliou a aplicabilidade do modelo SWAT para simular a vazão na bacia do Alto Rio Jardim (DF). Encontrou valores satisfatórios para NSE de 0,60 e R<sup>2</sup> de 0,66, realizando calibração e validação de vazão diária. Conforme os resultados, os valores intermediários de NSE e R<sup>2</sup> podem ser atribuídos à utilização de dados de uso

do solo diretamente da base de dados do SWAT, ao uso de séries históricas curtas, a utilização de calibração manual e a não consideração da demanda hídrica na região.

Salles (2012) realizou calibração manual de vazões mensais para a predição de vazões no ribeirão Pípiripau (DF). Os valores de NSE de 0,67, PBIAS de -6,70% e RSR de 0,58 indicaram um bom ajuste da vazão média mensal simulada pelo modelo e a vazão observada na bacia.

Fernandes (2015) estimou a vazão e a produção de sedimentos na bacia do Rio São Francisco, para seis projetos. Adotou o *software* SWAT-CUP para calibração do modelo. Conforme os resultados, a redução da eficiência do modelo pode estar relacionada com o mapa de uso e cobertura do solo. Os melhores resultados estatísticos corresponderam ao coeficiente de *Nash e Sutcliffe* de 0,94 e  $R^2$  de 0,99.

Observa-se que o modelo SWAT exige dados de parâmetros pedológicos e de parâmetros de uso e cobertura do solo. Na falta destas informações os dados são obtidos na literatura ou no próprio modelo (*default*). Este fator acaba por interferir nos resultados da simulação. Assim, a obtenção de dados de campo da área em estudo contribui para uma estimativa da vazão de forma mais satisfatória.

## 4.5 Validação

Na etapa de validação do modelo foram utilizados os mesmos parâmetros hidrológicos definidos durante a calibração, sendo alterados os parâmetros climáticos em função do novo período de dados utilizado 01/01/2011 a 31/12/2013. O hidrograma (Figura 17), representa o comportamento da vazão simulada em relação a vazão observada e as incertezas do modelo (95PPU). O comportamento da ocorrência de precipitação na região, também é apresentado.

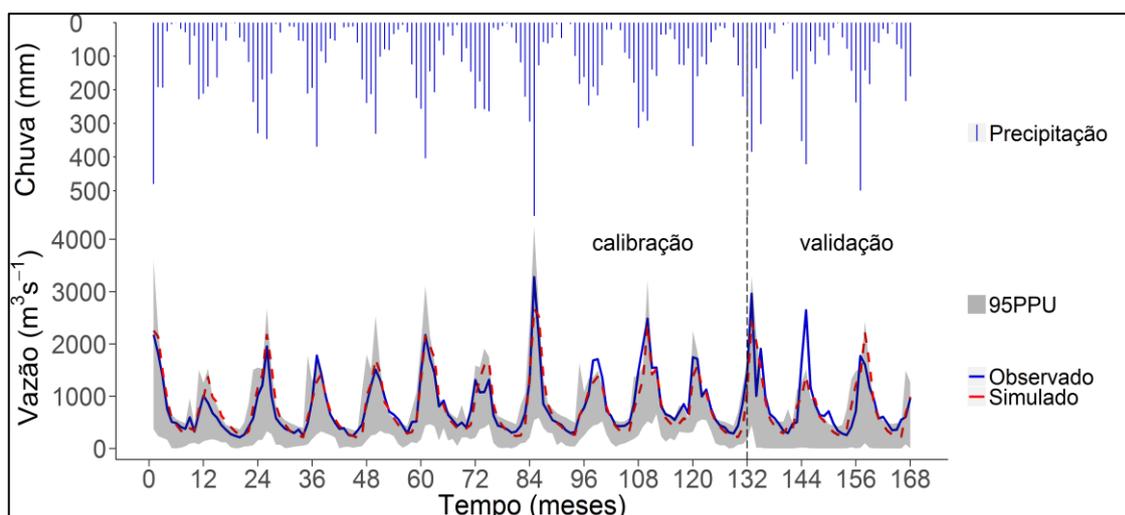


Figura 17 - Hidrograma para vazões médias mensais estimadas pelo SWAT e vazões médias mensais observadas na estação fluviométrica 19004 para o período de calibração (2000-2010) e validação (2011-2013).

De forma geral, a vazão observada é bem representada pela vazão simulada, embora sejam perceptíveis dificuldades na representação de alguns picos de vazão no período de validação; variação também observada no período de calibração. Na validação, o modelo não conseguiu representar de forma satisfatória, principalmente o pico de vazão observado em 2012.

Para Pereira *et al.* (2016) esta variação de picos de vazão entre o observado e o simulado pode estar relacionada com a representatividade espacial e temporal dos padrões de chuva. Os valores dos coeficientes estatísticos obtidos para os períodos de calibração e validação são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores dos coeficientes estatísticos para o período de Calibração (2000-2010) e Validação (2011-2013)

<b>Estatística de precisão</b>	<b>Resultado (Calibração)</b>	<b>Resultado (Validação)</b>
NSE	0,86	0,64
R <sup>2</sup>	0,87	0,66
PBIAS(%)	1,10	6,10

Os valores dos coeficientes estatísticos (NSE e  $R^2$ ) para o período de validação foram consideravelmente menores que os valores encontrados durante a calibração. Entretanto, o modelo é considerado satisfatório de acordo com a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007).

Quanto aos parâmetros de avaliação de ajuste do modelo (predição de incerteza), o P-Fator variou de 0,94 (calibração) para 0,69 (validação) e o R-Fator variou de 1,59 (calibração) para 1,53 (validação). Abbaspour *et al.* (2015) recomendam um valor de P-Fator maior que 0,7 e R-Fator menor que 1,5. Contudo, os autores destacam que estes valores podem variar dependendo da adequação dos dados de entrada e de calibração do modelo.

Ghobadi *et al.* (2015) simulam processos hidrológicos na bacia do rio Karkheh, no Irã, utilizando o SWAT-CUP para processos de calibração e análise de incertezas e também obtiveram valores dos parâmetros de avaliação do modelo um pouco abaixo do recomendado. Atribuem os resultados da simulação principalmente à contabilização inadequada do uso de água em áreas agrícolas e industriais na bacia sob análise.

Fukunaga (2012) estimou vazões em bacias hidrográficas do Espírito Santo e identificou uma redução no valor do NSE do período de calibração (0,75) para o período de validação (0,57), o valor de  $R^2$  também apresentou redução (0,76 para 0,63).

Pereira *et al.* (2016) utilizou processos de tentativa e erro durante a calibração e validação de modelagem hidrológica para vazões diárias, na bacia do Rio Pomba (MG) e obteve resultados considerados bons de acordo com a literatura: NSE de 0,76 e PBIAS de 4,6%, na calibração; e NSE de 0,76 e PBIAS de 5,1%, na validação. Os resultados apontam que os valores de vazões de pico seriam melhor representados se houvessem melhorias na representatividade da precipitação.

Pereira *et al.* (2014) simularam a vazão diária na bacia do rio Galo (ES) utilizando quatro anos de dados para calibração (1997-2000) e três anos de dados para validação (2001-2003), aplicando processos de tentativa e erro. Encontraram  $R^2$  de 0,91 e NSE de 0,65 para a calibração e  $R^2$  de 0,92 e NSE 0,70 para a validação. O modelo apresentou tendência de 7,2% (PBIAS) de subestimação das vazões médias diárias, na calibração e de 14% na validação.

Para Abbaspour *et al.* (2007) um modelo de bacia hidrográfica não pode ser totalmente validado, podem existir condições na bacia hidrográfica que não estão sendo modeladas (exemplo: alterações nas condições de uso de água para irrigação). Estas incertezas podem levar a resultados insatisfatórios e tornar a validação em um grande desafio para o modelador.

Para Faramarzi *et al.* (2009) as incertezas na modelagem hidrológica podem estar relacionadas a fatores como: irrigação; descargas de águas residuais (industrial e urbana); interação entre águas superficiais e subterrâneas; ocorrência de deslizamento de terra, o que altera a quantidade de sedimentos transportados e, conseqüentemente, a quantidade de água. Abbaspour *et al.* 2015 acrescentaram a estas incertezas a qualidade dos dados de entrada. Setegn *et al.* (2008) destacaram as incertezas em relação aos parâmetros climáticos, principalmente precipitação e temperatura.

## 5 CONCLUSÕES

Neste estudo o modelo hidrológico SWAT foi utilizado na simulação de vazão ao reservatório da UHE Furnas. O modelo foi calibrado para a estação fluviométrica localizada no exutório da bacia, próximo ao reservatório da usina hidrelétrica. A calibração e a análise de incerteza foram realizadas com o algoritmo de otimização SUFI-2, através da interface SWAT-CUP.

O desempenho do modelo SWAT na simulação de vazão afluente foi estatisticamente satisfatório, indicando que o modelo conseguiu representar os processos hidrológicos da bacia em estudo e pode ser utilizado na análise de cenários. Assim, sua aplicação pode contribuir na determinação de políticas de uso e ocupação do solo no entorno da bacia e no gerenciamento dos recursos hídricos da região. O que impactará diretamente na disponibilidade de água para a geração de energia.

O modelo produziu resultados mais satisfatórios para calibração do que para a validação, o que pode estar relacionado com a representatividade dos dados de precipitação e a outras condições que não estão sendo modeladas, como o uso de água para irrigação.

Para uma melhor estimativa dos valores extremos de vazão, o modelo precisa ser aprimorado na parte de representatividade do regime de precipitação, com aplicação de dados de estações pluviométricas em maior número e mais distribuídas ao longo da bacia. Assim como os valores das vazões mínimas podem ser melhor ajustados com a utilização de dados de campo das características do solo e de uso e cobertura do solo.

A análise da série histórica mostrou uma tendência de redução na vazão afluente (entre 2010 e 2015), o que tem refletido no volume útil do reservatório nos mesmos anos. Essa tendência de redução não foi claramente identificada na decomposição da série histórica de precipitação. Apesar da precipitação ser uma das principais variáveis

que influenciam na vazão (principalmente nos valores extremos), existem outros fatores que podem estar interferindo na redução da vazão da bacia em estudo, como o aumento do volume de água utilizado para irrigação de áreas agrícolas e alterações no uso e cobertura do solo. Justificando, assim, a tendência de redução da vazão afluenta.

A determinação dos parâmetros hidrológicos mais sensíveis, contribuiu para uma melhor compreensão do regime hidrológico na bacia, identificando os parâmetros que mais interferem nos resultados da predição da vazão, como por exemplo o CN2, o CH\_N1 e o ALPHA\_BF que estão relacionados com a contribuição da água subterrânea ao escoamento, e conseqüentemente à vazão.

Uma das limitações da aplicação da modelagem SWAT na bacia do rio Grande foi a disponibilidade de dados, principalmente das séries históricas de precipitação e vazão. Esta limitação está relacionada ao número de estações de medição, sua distribuição ao longo da bacia e ao tamanho das séries temporais.

A disponibilidade dos dados de forma satisfatória, permitiria uma melhor representatividade espacial da precipitação e a calibração em diferentes sub-bacias, tornando as predições mais precisas e proporcionando a redução das incertezas.

Entre as oportunidades para pesquisas futuras, destacam-se:

- Estudo dos efeitos das mudanças climáticas sobre a vazão, através da simulação da vazão sob diferentes cenários climáticos; e
- Estudos dos efeitos das mudanças no uso e ocupação do solo sobre a vazão, e sua repercussão sobre os processos hidrológicos da bacia.

## REFERÊNCIAS

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

ABBASPOUR, K. C. *SWAT-CUP - SWAT Calibration and Uncertainty Programs*. 2015. Disponível em: < [http://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual\\_swatcup.pdf](http://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf)>. Acesso em: 03 jan. 2017.

ABBASPOUR, K. C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLOVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, v. 524, p. 733-752, 2015.

ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen SHE 2, Structure of a physically based distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, v. 87, p. 61-77, 1986.

AHMADI, M.; HADDAD, O. B.; LOÁICIGA, H. Adaptive reservoir operation rules under climatic change. *Water Resources Management*, v. 29, n. 4, p. 1247-1266, mar. 2015.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. *FAO irrigation and drainage paper, n. 56*. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements, 2006. Disponível em: <<http://kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>> Acesso em: 12 dez. 2016.

ALVES, L. A.; UTURBEY, W. Environmental degradation costs in electricity generation: the case of the Brazilian electrical matrix. *Energy Policy*, v. 38, n.10, p. 6204-6214, out. 2010.

ANA. Agência Nacional de Águas. *Região Hidrográfica do Paraná*, 2016a. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/parana.aspx>>. Acesso em: 17 jul. 2016.

ANA. Agência Nacional de Águas. *Sistema de acompanhamento de reservatórios - SAR*, 2016b. Disponível em: < <http://sar.ana.gov.br/MedicaoSIN>>. Acesso em: 02 jan. 2017.

ANEEL. *Agência Nacional de Energia Elétrica*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Banco de Informações de Geração*, 2016a. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Matriz de Energia Elétrica*, 2016b. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

ANSAR, A.; FLYYBIERG, B.; BUDZIER, A.; LUNN, D. Should we build more large dams? the actual costs of hydropower megaproject development. *Energy Policy*, v. 69, p.43-56, jun. 2014.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 34, n. 1, p. 73-89, fev. 1998.

ARNOLD, J. G. *Input/Output documentation*. Texas Water Resources Institute, 2012. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/documentation/2012-io/>>. Acesso em: 12 nov. 2016.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J. SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M. W. KANNAN, N.; JHA, M. K. Swat: model use, calibration and validation. *Transactions of the ASABE*, v. 55, n. 4, p.1491-1508, 2012.

ARROIO JÚNIOR, P. P. *Avaliação da produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Itaqueri, município de Itirapina e Brotas-SP*. 2013. 134f. Dissertação (Mestrado)-Escola de Engenharia Civil de São Carlos, São Paulo, 2013.

BALDISSERA, G. C. *Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT*. 2005. 148f. Dissertação (Mestrado)-Programa de Pós-Graduação de Física e Meio Ambiente, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.

BANNWARTH, M. A.; SANGCHAN, W.; HUGENSCHMIDT, C.; LAMERS, M.; INGWERSEN, J.; ZIEGLER, A. D.; STRECK, T. Pesticide transport simulation in a tropical catchment by SWAT. *Environmental Pollution*, v. 191, p. 70-79, ago. 2014.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 8, n. 3, p. 9-35, 2015.

BRAVO, J. M.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; UVO, C. B.; PEDROLLO, O. C.; CHOU, S. C. Incorporating forecasts of rainfall in two hydrologic models used for medium-range streamflow forecasting. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 14, n. 5, p. 435-445, 2009.

CASTRO, K. B. *Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada*. 2013. 141f. Dissertação (Mestrado)- Instituto de Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CAUCHICK MIGUEL, P. A.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N.; LIMA, E. P.; TURRIONI, J. B.; HO, L. L.; MORABITO, R.; MARTINS, R. A.; SOUSA, R.; COSTA, S. E. G.; PUREZA, V. *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier ABEPRO, 2012.

CBH. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Grande. *A bacia hidrográfica do rio Grande*, 2016a. Disponível em: <<http://www.grande.cbh.gov.br/Bacia.aspx>>. Acesso em: 17 jul. 2016.

CBH. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Grande. *Comitê da bacia hidrográfica do entorno do lago de Furnas – GD3*, 2016b. Disponível em: <http://www.grande.cbh.gov.br/GD3.aspx>. Acesso em: 17 jul. 2016.

CHEN, J.; SHI, H.; SIVAKUMAR, B.; PEART, M. R. Population, water, food, energy and dams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 56, p. 18-28, abr. 2016.

- DU, J.; RUI, H.; ZUO, T.; LI, Q.; ZHENG, D.; CHEN, A.; XU, Y.; XU, C. Y. Hydrological simulation by SWAT model with fixed and varied parameterization approaches under land use change. *Water Resource Management*, v. 27, p. 2823-2838, 2013.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). *Balço Energético Nacional 2015: ano base 2014 / Empresa de Pesquisa energética – Rio de Janeiro: EPE, 2015*. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2015.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf)>. Acesso em: 20 jun. 2016.
- FARAMARZI, M.; ABBASPOUR, K.C.; SCHULIN, R.; YANG, H. Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological process*, v. 23, n. 3, p. 486-501, 2009.
- FEARNSIDE, P. M. Tropical hydropower in the clean development mechanism: Brazil's Santo Antônio Dam as an example of the need for change. *Climatic Change*, v. 131, n. 4, p. 575-589, ago. 2015.
- FERNANDES, J. G. *Estimativa de vazão e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT*. 2015. 185f. Tese (Doutorado)-Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2015.
- FERREIRA, J. H. I.; CAMACHO, J. R.; MALAGOLI, J. A.; GUIMARÃES JÚNIOR, S. C. Assessment of the potential of small hydropower development in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 56, p. 380-387, abr. 2016.
- FUKUNAGA, D. C. *Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo usando SWAT*. 2012. 108f. Dissertação (Mestrado)-Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2012.
- FURNAS. *Parque gerador - usina hidrelétrica de Furnas*, 2016. Disponível em: <[http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina\\_hidr\\_furnas.asp](http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_furnas.asp)>. Acesso em: 17 jul. 2016.
- GAUDARD, L.; GILLI, M.; ROMERIO, F. Climate change impacts on hydropower management. *Water Resources Management*, v. 27, n. 15, p. 5143-5156, dez. 2013.
- GAUDARD, L.; ROMERIO, F.; VALLE, F. D.; GORRET, R.; MARAN, S.; RAVAZZANI, G.; STOFFEL, M.; VOLONTERIO, M. Climate change impacts on hydropower in the Swiss and Italian Alps. *Science of the Total Environment*, v. 493, p. 1211-1221, set. 2014.
- GHOBADI, Y.; PRADHAN, B.; SAYYAD, G. A.; KABIR, K.; FALAMARZI, Y. Simulation of hydrological processes and effects of engineering projects on the Karkheh River Basin and its wetland using SWAT2009. *Quaternary International*, v. 374, p. 144-153, 2015.
- GREEN, C. H.; VAN GRIENSVEN, A. Autocalibration in hydrologic modeling: using SWAT2005 in small-scale watersheds. *Environmental Modelling & Software*, v. 23, p. 422-434, 2008. doi:10.1016/j.envsoft.2007.06.002
- GUPTA, H.V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.

HAGUMA, D.; LECONTE, R.; CÔTÉ, P.; KRAU, S.; BRISSETTE, F. Optimal hydropower generation under climate change conditions for a northern water resources system. *Water Resources Management*, v. 28, n. 13, p. 4631-4644, out. 2014.

HUANG, S.; ZANG, W.; XU, M.; LI, X.; XIE, X.; LI, Z.; ZHU, J. Study on runoff simulation of the upstream of Minjiang River under future climate change scenarios. *Natural Hazards*, v. 75, p. S139-S154, 2015.

HUNT, J. D.; FREITAS, M. A. V.; PEREIRA JR., A. O. Enhanced-Pumped-Storage: Combining pumped-storage in a yearly storage cycle with dams in cascade in Brazil. *Energy*, v. 78, p. 513-523, dez. 2014.

IEA. International Energy Agency. *Technology roadmap: hydropower*, 2012. Disponível em: <[http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012\\_Hydropower\\_Roadmap.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012_Hydropower_Roadmap.pdf)>. Acesso em: 21 abr. 2016.

IEA. International Energy Agency. *Key world energy statistics*, 2015. Disponível em: <[https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld\\_Statistics\\_2015.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf)>. Acesso em: 17 jun. 2016.

IESA. Instituto de Estudos Sócio Ambientais da UFG. *Relatório de pesquisa e desenvolvimento de propriedade intelectual de Furnas Centrais Elétricas S.A.*, Financiamento: ANEEL, Goiânia, 2015.

IHA. *International Hydropower Association*. Disponível em: <<https://www.hydropower.org/>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

IHA. International Hydropower Association. *The role of hydropower in sustainable development*, 2003. Disponível em: <[http://www2.ce.metu.edu.tr/~ce571/links/announcement/LowRes\\_Hydropower\\_in\\_Sustainable\\_Development.pdf](http://www2.ce.metu.edu.tr/~ce571/links/announcement/LowRes_Hydropower_in_Sustainable_Development.pdf)>. Acesso em: 24 abr. 2016.

IHA. International Hydropower Association. *Types of hydropower*, 2016a. Disponível em: <<https://www.hydropower.org/types-of-hydropower>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. *Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa (BDMEP)*, 2016. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 17 jul. 2016.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability - Fifth assessment report – Part B: Regional Aspects*, 2014. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIAR5-Chap27\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIAR5-Chap27_FINAL.pdf)>. Acesso em: 17 jun. 2016.

JONG, P.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. Economic and environmental analysis of electricity generation technologies in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 52, p. 725-739, dez. 2015.

LEHNER, B.; CZISCH, G.; VASSOLO, S. The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis. *Energy Policy*, v. 33, n. 7, p. 839-855, maio 2005.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O.; Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v.36, p. 623-634, 2012.

LESSA, A. C. R.; SANTOS, M. A.; MADDOCK, J. E. L.; BEZERRA, C. S. Emissions of greenhouse gases in terrestrial areas pre-existing to hydroelectric plant reservoirs in the Amazon: the case of Belo Monte hydroelectric plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 51, p. 1728-1736, nov. 2015.

LÓPEZ-MORENO, J. I.; ZABALZA, J.; VICENTE-SERRANO, S. M.; REVUELTO, J.; GILABERTE, M.; AZORIN-MOLINA, C.; MORÁN-TEJEDA, E.; GARCÍA-RUIZ, J. M.; TAGUE, C. Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. *Science of The Total Environment*, v. 493, p. 1222-1231, set. 2014.

LUMBROSO, D. M.; WOOLHOUSE, G.; JONES, L. A review of the consideration of climate change in the planning of hydropower schemes in sub-Saharan Africa. *Climatic Change*, v. 133, n. 4, p. 621-633, dez. 2015.

MELIKOGLU, M. Hydropower in Turkey: analysis in the view of vision 2023. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 25, p. 503-510, set. 2013.

MELLO, F. M. *A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI*: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: CBDB, 2011. Disponível em: <[http://www.cbdb.org.br/documentos/a\\_historia\\_das\\_barragens\\_no\\_brasil.pdf](http://www.cbdb.org.br/documentos/a_historia_das_barragens_no_brasil.pdf)>. Acesso em: 17 ago. 2016.

MME. Ministério de Minas e Energia. *Energia Hidráulica em 2014 no Brasil e Mundo*, 2015. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138769/2252804/Energia+Hidr%C3%A1ulica+em+2014.pdf/a4f31f91-1737-4f3b-85fb-f960706d0c56>>. Acesso em: 08 maio 2016.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MUKHEIBIR, P. Potential consequences of projected climate change impacts on hydroelectricity generation. *Climatic Change*, v. 121, n. 1, p. 67-78, set. 2013.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models, part I - a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, n. 3, p. 282-290, abr. 1970.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. *Ferramenta de avaliação do solo e água – Documentação teórica*. Instituto de Recursos Hídricos do Texas – Relatório técnico nº 406. Texas A&M University System, College Station, Texas, 2011. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/media/99193/swat2009-theory-portuguese.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2016.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Diagrama esquemático das usinas hidrelétricas do SIN*, 2016a. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/conheca\\_sistema/pop\\_diagrama\\_esquemat\\_usinas.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/pop_diagrama_esquemat_usinas.aspx)>. Acesso em: 17 jul. 2016.

PEREIRA, D. R.; ALMEIDA, A. Q.; MARTINEZ, M. A.; ROSA, D. R. Q. Impacts of deforestation on water balance components of a watershed on the Brazilian east coast. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 38, p.1350-1358, 2014.

PEREIRA, D. R.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKIB, F. F.; SILVA, D. D. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 7, p. 14-37, 2016.

PIANOSI, F.; BEVEN, K.; FREER, J.; HALL, J. W.; ROUGIER, J.; STEPHENSON, D. B.; WAGENER, T. Sensitivity analysis of environmental models: a systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, v. 79, p. 214-232, maio 2016.

POTTMAIER, D.; MELO, C. R.; SARTOR, M. N.; KUESTER, S.; AMADIO, T. M.; FERNANDES, C. A. H.; MARINHA, D.; ALARCON, O. E. The Brazilian energy matrix: from a materials science and engineering perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 19, p. 678-691, mar. 2013.

PRADO JR., F. A.; ATHAYDE, S.; MOSSA, J.; BOHLMAN, S.; LEITE, F.; OLIVER-SMITH, A. How much is enough? An integrated examination of energy security, economic growth and climate change related to hydropower expansion in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 53, p. 1132-1136, jan. 2016.

RAJIB, M. A.; MERWADE, V. Improving soil moisture accounting and streamflow prediction in SWAT by incorporating a modified time-dependent Curve Number method. *Hydrological Processes*, v. 30, p. 603-624, 2016.

RIBEIRO, A. E. D.; AROUCA, M. C.; COELHO, D. M. Electric energy generation from small-scale solar and wind power in Brazil: the influence of location, area and shape. *Renewable Energy*, v. 85, p. 554-563, jan. 2016.

RIBEIRO JÚNIOR, L. U.; ZUFFO, A. C.; SILVA, B. C. Development of a tool for hydroelectric reservoir operation with multiple uses considering effects of climate changes. Case study of Furnas HPP. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 2, p. 300-313, abr./jun. 2016.

ROCHA, J.; ROEBELING, P.; RIAL-RIVAS, M. E. Assessing the impacts of sustainable agricultural practices for water quality improvements in the Vouga catchment (Portugal) using the SWAT model. *Science of the Total Environment*, v. 536, p. 48-58, 2015.

ROMANOWICZ, A. A.; VANCLOOSTER, M.; ROUNSEVELL, M.; LA JUNESSE, I. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium. *Ecological Modelling*, v. 187, p. 27-39, 2005.

ROSA, D. R. Q. *Modelagem Hidrossedimentológica na bacia hidrográfica do rio Pomba utilizando o SWAT*. 2016. 127f. Tese (Doutorado)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

ROUHOLAHNEJAD, E.; ABBASPOUR, K. C.; VEJDANI, M.; SRINIVASAN, R.; SCHULIN, R.; LEHMANN, A. A parallelization framework for calibration of hydrological models. *Environmental Modelling & Software*, v. 31, p. 28-36, 2012.

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

SAMPLE, J. E.; DUNCAN, N.; FERGUSON, M.; COOKSLEY, S. Scotland's hydropower: current capacity, future potential and the possible impacts of climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 52, p. 111-122, dez. 2015.

SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 37, n. 5, p. 1169-1188, out. 2001.

SARRAZIN, F.; PIANOSI, F.; WAGENER, T. Global sensitivity analysis of environmental models: convergence and validation. *Environmental Modelling & Software*, v. 79, p. 135-152, maio 2016.

SARTORI, A. *Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos*. 2004. 189f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 5-18, 2005.

SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; LUCENA, A. F. P.; BORBA, B. S. M. C.; NOGUEIRA, L. P. P.; FLEMING, F. P.; TROCCOLI, A.; HARRISON, M.; BOULAHYA, M. S. Energy sector vulnerability to climate change: a review. *Energy*, v. 38, n. 1, p. 1-12, fev. 2012.

SCHAEFLI, B. Projecting hydropower production under future climates: a guide for decision-makers and modelers to interpret and design climate change impact assessments. *Wiley Interdisciplinary Reviews: water*, v. 2, n. 4, p. 271–289, mar. 2015.

SCHMIDT, J.; CANCELLA, R.; PEREIRA JR., A. O. An optimal mix of solar PV, wind and hydro power for a low-carbon electricity supply in Brazil. *Renewable Energy*, v. 85, p. 137-147, jan. 2016.

SETEGN, S.G.; SRINIVASAN, R.; DARGAHI, B. Hydrological modelling in the Lake Tana Basin, Ethiopia using SWAT model. *The Open Hydrology Journal*, v. 2, p.49-62, 2008.

SILVA, R. C. D.; MARCHI NETO, I.; SEIFERT, S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 59, p. 328–341, jun. 2016.

SOITO, J. L. S.; FREITAS, M. A. V. Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 6, p. 3165-3177, ago. 2011.

SPALDING-FECHER, R.; CHAPMAN, A.; YAMBA, F.; WALIMWIPI, H.; KLING, H.; TEMBO, B.; NYAMBE, I.; CUAMBA, B. The vulnerability of hydropower production in the Zambezi River Basin to the impacts of climate change and irrigation development. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 19, p. 1-22, nov. 2014.

STRAUCH, M.; BERNHOFER, C.; KOIDE, S.; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, v. 414-415, p. 113-424, 2012.

SUN, L.; LU, W.; YANG, Q.; MARTIN, J. D.; LI, D. Ecological compensation estimation of soil and water conservation based on cost-benefit analysis. *Water Resource Management*, v. 27, p. 2709-2727, 2013.

USDA-NRCS. 2004. *National engineering handbook-part 630: chapter 10 – estimation of direct runoff from storm rainfall*. Disponível em: <<http://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHydrology/ch10.pdf>>. Acesso em: 05 set. 2016.

VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER, T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; SIRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, v. 324, n. 1-4, p. 10-23, jun. 2006.

VAN LIEW, M. W.; ARNOLD, J. G.; GARBRECHT, J. D. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: choosing between two models. *Transactions of the ASAE*, v. 46, n. 6, p. 1539-1551, 2003.

VIGIAK, O.; MALAGÓ, A.; BOURAOU, F.; VANMAERCCKE, M.; POESEN, J. Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins. *Science of the Total Environment*, v. 538, p. 855-875, 2015.

WAGNER, P. D.; BHALLAMUDI, S. M.; NARASIMHAN, B.; KANTAKUMAR, L. N.; SUDHEER, K. P.; KUMAR, S.; SCHNEIDER, K.; FIENER, P. Dynamic integration of land use changes in a hydrologic assessment of a rapidly developing Indian catchment. *Science of the Total Environment*, v. 539, p. 153-164, 2016.

OLIVEIRA, W. N. *Avaliação da qualidade ambiental da paisagem da bacia hidrográfica e do reservatório do ribeirão João Leite*. 2013. 179f. Dissertação (Mestrado)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

WESTIN, F. F.; SANTOS, M. A.; MARTINS, I. D. Hydropower expansion and analysis of the use of strategic and integrated environmental assessment tools in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 37, p. 750-761, set. 2014.

WU, Y.; LIU, S. Modeling of land use and reservoir effects on nonpoint source pollution in a highly agricultural basin. *Journal of Environmental Monitoring*, v. 12, p. 2350-2361, 2012.

YEN, H.; JEONG, J.; FENG, Q. Y.; DEB, D. Assessment of input uncertainty in SWAT using latent variables. *Water Resource Management*, v. 29, p. 1137-1153, 2015.

ZARFL, C.; LUMSDON, A. E.; BERLEKAMP, J.; TYDECKS, L.; TOCKNER, K. A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*, v. 77, n. 1, p.161-170, jan. 2015.

ZHANG, L.; NAN, Z.; YU, W.; GE, Y. Modeling land-use and land-cover change and hydrological responses under consistent climate change scenarios in the Heihe River Basin, China. *Water Resource Management*, v. 29, p. 4701-4717, 2015.

ZHOU, J.; HE, D.; XIE, Y.; LIU, Y.; YANG, Y.; SHENG, H.; GUO, H.; ZHAO, L.; ZOU, R. Integrated SWAT model and statistical downscaling for estimating streamflow response to climate change in the Lake Dianchi watershed, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 29, n. 4, p. 1193-1210, 2015.

## APÊNDICE A – Características físicas do solo obtidas na literatura

CLASSE	AFLR	PVE	PVD	PVAD	PVAE	CXE	CXD	GXD	GMD	LVAD	LVD	LAD	RLD	RYD	NXD	NVE
NLAYERS	1	4	3	2	3	5	2	4	4	2	2	4	4	4	2	3
HYDGRP	D	C	B	C	C	C	C	D	D	A	A	A	D	C	B	B
SOL_ZMX	1524.00	1900.00	1300.00	1200.00	1900.00	1380.00	700.00	1300.00	1300.00	1400.00	1300.00	1960.00	800.00	1400.00	1200.00	1900.00
ANION_EXCL	0.50	0.50	0.32	0.50	0.50	0.50	0.50	0.39	0.39	0.50	0.50	0.50	0.40	0.33	0.50	0.50
SOL_CRK	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
SOL_Z1	1524.00	150.00	200.00	200.00	150.00	200.00	200.00	80.00	80.00	200.00	350.00	200.00	50.00	130.00	200.00	150.00
SOL_BD1	2.50	1.18	1.70	1.19	1.19	1.08	1.08	1.40	1.40	1.14	1.14	1.14	1.60	1.60	1.19	1.19
SOL_AWC1	0.01	0.15	0.40	0.19	0.21	0.18	0.24	1.00	1.00	0.23	0.29	0.18	0.15	1.00	0.19	0.21
SOL_K1	180.00	65.00	90.00	65.00	65.00	45.00	45.00	12.50	12.50	75.00	75.00	75.00	12.50	32.50	65.00	65.00
SOL_CBN1	0.00	0.76	1.30	0.79	1.62	0.89	1.77	2.80	2.80	1.78	1.43	1.36	0.40	1.70	0.79	1.62
CLAY1	5.00	28.00	11.70	42.00	23.00	20.00	54.00	26.40	26.40	43.00	76.00	38.00	17.20	13.70	42.00	23.00
SILT1	25.00	11.00	18.10	10.00	16.00	15.00	11.00	71.50	71.50	10.00	12.00	7.00	29.40	56.70	10.00	16.00
SAND1	70.00	61.00	70.20	48.00	61.00	65.00	35.00	2.10	2.10	47.00	12.00	55.00	53.40	29.60	48.00	61.00
ROCK1	98.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOL_ALB1	0.23	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.15	0.15
USLE_K1	0.01	0.13	0.14	0.12	0.12	0.14	0.09	0.31	0.31	0.09	0.10	0.10	0.17	0.16	0.12	0.12
SOL_EC1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOL_Z2	0.00	450.00	550.00	1200.00	300.00	520.00	700.00	450.00	450.00	1400.00	1300.00	400.00	300.00	530.00	1200.00	300.00
SOL_BD2	0.00	1.50	1.70	1.50	1.35	1.10	1.10	1.50	1.50	1.05	1.14	1.14	1.60	1.60	1.50	1.35
SOL_AWC2	0.00	0.16	0.40	0.28	0.29	0.17	0.27	0.10	0.10	0.27	0.29	0.25	0.15	1.00	0.28	0.29
SOL_K2	0.00	35.00	90.00	21.00	45.00	20.00	20.00	5.00	5.00	33.00	33.00	50.00	12.50	12.50	21.00	45.00
SOL_CBN2	0.00	0.20	0.60	0.19	0.94	0.16	0.92	0.70	0.70	1.40	0.81	0.64	0.60	0.50	0.19	0.94
CLAY2	0.00	32.00	18.80	61.00	35.00	19.00	57.00	37.80	37.80	62.00	82.00	56.00	24.70	13.30	61.00	35.00
SILT2	0.00	10.00	17.20	8.00	16.00	23.00	12.00	56.30	56.30	7.00	7.00	5.00	25.60	46.00	8.00	16.00
SAND2	0.00	58.00	64.00	61.00	49.00	58.00	31.00	5.90	5.90	31.00	11.00	39.00	49.70	40.70	61.00	49.00
ROCK2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOL_ALB2	0.00	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.15	0.15
USLE_K2	0.00	0.13	0.15	0.10	0.13	0.17	0.11	0.30	0.30	0.08	0.10	0.09	0.16	0.18	0.10	0.13
SOL_EC2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOL_Z3	0.00	1650.00	1300.00	0.00	1900.00	880.00	0.00	750.00	750.00	0.00	0.00	1600.00	300.00	960.00	0.00	1900.00
SOL_BD3	0.00	1.35	1.70	0.00	1.29	1.16	0.00	1.60	1.60	0.00	0.00	1.03	1.60	1.50	0.00	1.29
SOL_AWC3	0.00	0.25	0.70	0.00	0.34	0.19	0.00	0.70	0.70	0.00	0.00	0.24	0.15	1.00	0.00	0.34
SOL_K3	0.00	21.00	12.50	0.00	21.00	20.00	0.00	40.00	40.00	0.00	0.00	19.00	12.50	12.50	0.00	21.00
SOL_CBN3	0.00	0.30	0.30	0.00	0.36	0.07	0.00	0.30	0.30	0.00	0.00	0.30	0.60	1.30	0.00	0.36
CLAY3	0.00	54.00	20.80	0.00	53.00	20.00	0.00	25.60	25.50	0.00	0.00	56.50	24.70	23.00	0.00	53.00
SILT3	0.00	9.00	18.30	0.00	21.00	25.00	0.00	62.40	62.40	0.00	0.00	6.00	25.60	68.10	0.00	21.00
SAND3	0.00	47.00	60.90	0.00	26.00	57.00	0.00	12.00	12.00	0.00	0.00	37.50	49.70	8.90	0.00	26.00
ROCK3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOL_ALB3	0.00	0.15	0.15	0.00	0.15	0.15	0.00	0.16	0.16	0.00	0.00	0.15	0.15	0.16	0.00	0.15
USLE_K3	0.00	0.11	0.16	0.00	0.14	0.17	0.00	0.26	0.26	0.00	0.00	0.10	0.16	0.27	0.00	0.15
SOL_EC3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOL_Z4	0.00	1900.00	0.00	0.00	0.00	1200.00	0.00	1300.00	1300.00	0.00	0.00	1960.00	800.00	1400.00	0.00	0.00
SOL_BD4	0.00	1.26	0.00	0.00	0.00	1.36	0.00	1.70	1.70	0.00	0.00	1.15	1.30	1.50	0.00	0.00
SOL_AWC4	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.50	0.50	0.00	0.00	0.24	0.18	1.00	0.00	0.00
SOL_K4	0.00	5.00	0.00	0.00	0.00	20.00	0.00	12.50	12.50	0.00	0.00	19.00	12.50	12.50	0.00	0.00
SOL_CBN4	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.30	0.30	0.00	0.00	0.20	0.76	0.60	0.00	0.00
CLAY4	0.00	57.00	0.00	0.00	0.00	18.00	0.00	21.50	21.50	0.00	0.00	56.00	32.00	27.70	0.00	0.00
SILT4	0.00	12.00	0.00	0.00	0.00	18.00	0.00	57.30	57.30	0.00	0.00	5.00	35.00	67.40	0.00	0.00
SAND4	0.00	31.00	0.00	0.00	0.00	64.00	0.00	21.20	21.20	0.00	0.00	39.00	33.00	14.95	0.00	0.00
ROCK4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOL_ALB4	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.16	0.16	0.00	0.00	0.15	0.15	0.15	0.00	0.00
USLE_K4	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.21	0.21	0.00	0.00	0.09	0.16	0.25	0.00	0.00
SOL_EC4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOL_Z5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1380.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOL_BD5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOL_AWC5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOL_K5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOL_CBN5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CLAY5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SILT5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SAND5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	35.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ROCK5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOL_ALB5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
USLE_K5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOL_EC5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

AFLR Afloramento de rocha; PVE Argissolo Vermelho eutrófico; PVD Argissolo Vermelho distrófico; PVAd Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; CXe Cambissolo Háplico eutrófico; CXd Cambissolo Háplico distrófico; GXd Gleissolo Háplico distrófico; GMD Gleissolo Melânico distrófico; LVAd Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVD Latossolo Vermelho distrófico; LAd Latossolo Amarelo distrófico; NLD Neossolo Litólico distrófico; NFD Neossolo Flúvico distrófico; NHD Nitossolo Háplico distrófico; e NVE Nitossolo Vermelho eutrófico.

## APÊNDICE B – Parâmetros climáticos calculados para cada estação

### Estação climática Lavras (MG)

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
PCPMM	293.23	165.87	161.76	49.21	35.26	17.30	12.70	14.89	52.97	92.92	194.89	270.47
PCPSTD	27.47	18.13	12.57	6.77	4.51	4.15	2.30	3.24	7.34	8.33	9.80	16.59
PCPSKW	1.53	2.34	3.61	5.15	1.87	11.67	6.69	8.25	2.93	1.56	1.14	4.05
PR_W1	0.33	0.31	0.30	0.17	0.10	0.09	0.06	0.06	0.15	0.24	0.41	0.47
PR_W2	0.77	0.66	0.64	0.45	0.38	0.28	0.33	0.35	0.46	0.56	0.63	0.74
PCPD	18.28	13.50	14.11	6.94	4.44	3.22	2.67	2.56	6.56	11.06	15.72	20.06
RAINHHMX	5.68	4.35	4.06	2.51	2.81	1.90	1.69	2.06	2.86	2.98	4.39	4.78
TMPMN	18.52	18.39	18.02	16.45	13.24	12.04	11.57	12.44	14.53	16.53	17.35	18.33
TMPMX	29.02	29.62	28.85	27.97	25.19	24.70	24.90	26.94	27.91	28.69	27.94	28.54
TMPSTDMN	1.14	1.20	1.21	2.06	2.38	2.24	2.38	2.18	2.36	2.07	1.89	1.29
TMPSTDMX	2.98	2.59	2.57	2.26	2.42	2.17	2.60	2.67	3.58	3.82	3.18	2.83
WNDVAV	2.28	2.19	2.22	2.26	2.14	2.04	2.29	2.58	2.74	2.67	2.61	2.35
DEWPT	19.21	18.96	18.92	17.09	14.23	13.28	12.06	11.58	13.51	15.74	17.70	19.14
SOLARAV	20.42	21.14	18.92	17.76	14.75	13.54	14.42	17.67	18.98	20.03	19.86	19.79

### Estação climática Machado (MG)

Parâmetros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
PCPMM	290.53	208.42	169.92	68.49	50.12	20.17	20.54	17.75	64.93	96.68	169.22	241.36
PCPSTD	25.72	19.56	12.09	7.95	5.20	4.32	3.54	3.41	8.03	7.52	11.53	11.24
PCPSKW	2.90	1.84	1.92	5.47	2.80	11.17	6.68	7.20	2.77	4.13	-0.55	2.76
PR_W1	0.38	0.35	0.37	0.21	0.13	0.08	0.08	0.08	0.18	0.25	0.41	0.51
PR_W2	0.78	0.71	0.62	0.53	0.41	0.35	0.38	0.27	0.50	0.57	0.66	0.72
PCPD	19.78	15.44	15.33	9.33	5.61	3.17	3.39	2.89	7.94	11.44	16.50	20.17
RAINHHMX	5.20	4.78	3.93	2.60	3.16	2.26	2.15	2.18	2.90	2.99	3.63	4.24
TMPMN	18.55	18.28	17.88	15.56	11.68	10.07	9.71	10.41	13.44	15.83	17.12	18.26
TMPMX	29.54	30.04	29.31	28.39	25.52	24.71	25.16	27.29	28.48	29.36	28.59	29.25
TMPSTDMN	1.21	1.32	1.48	2.51	2.85	2.67	2.85	2.63	2.73	2.34	2.04	1.40
TMPSTDMX	3.08	2.64	2.64	2.38	2.45	2.38	2.61	2.67	3.54	3.56	3.01	2.62
WNDVAV	0.63	0.61	0.53	0.47	0.42	0.37	0.46	0.57	0.74	0.66	0.67	0.65
DEWPT	20.40	19.98	19.83	17.86	14.69	13.70	12.92	12.46	14.52	16.72	18.48	20.00
SOLARAV	18.20	18.77	16.61	15.58	13.28	11.77	12.62	15.81	16.76	18.31	18.11	17.94

PCPMM: Precipitação mensal média (mm); PCPSTD: Desvio padrão da precipitação diária no mês (mm); PCPSKW: Coeficiente de assimetria para a precipitação diária no mês; PR\_W1: Probabilidade de dia úmido seguido de dia seco no mês (%); PR\_W2: Probabilidade de dia úmido seguido de dia úmido no mês (%); PCPD: Número médio de dias de precipitação no mês (dias); RAINHHMX: Precipitação máxima de 0,5 horas (mm); TMPMN: Temperatura mínima média no mês (°C); TMPMX: Temperatura máxima média no mês (°C); TMPSTDMN: Desvio padrão da temperatura mínima diária no mês (°C); TMPSTDMX: Desvio padrão da temperatura máxima diária no mês (°C); WNDVAV: Velocidade do vento diária média no mês ( $m s^{-1}$ ); DEWPT: Temperatura no ponto de orvalho (°C); e SOLARAV: Radiação solar diária média no mês ( $MJ m^{-2} dia^{-1}$ ).