



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO

MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

THIAGO GOMES FERREIRA

ESTUDO COMPARATIVO DA APLICAÇÃO DO MODELO *SOIL AND*
***WATER ASSESSMENT TOOL* (SWAT) E MÉTODOS USUAIS DE**
REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS DE REFERÊNCIA Q₉₀

VITÓRIA

2019

THIAGO GOMES FERREIRA

ESTUDO COMPARATIVO DA APLICAÇÃO DO MODELO *SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL* (SWAT) E MÉTODOS USUAIS DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS DE REFERÊNCIA Q₉₀

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, na linha de pesquisa de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof^o Dr^o Daniel Rigo

VITÓRIA

2019

THIAGO GOMES FERREIRA

ESTUDO COMPARATIVO DA APLICAÇÃO DO MODELO *SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL* (SWAT) E MÉTODOS USUAIS DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS DE REFERÊNCIA Q₉₀

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, na linha de pesquisa de Recursos Hídricos.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Rigo

Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

**Prof^ª. Dr^ª. Edumar Ramos Cabral
Coelho**

Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora Interna

Prof. Dr. Lucien Akabassi

Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Meus mais sinceros agradecimentos à todos que direta ou indiretamente contribuíram para que este momento da minha vida fosse possível. À minha amada esposa Dariane que sempre me apoiou e incentivou, não tenho palavras para agradecer por tudo: meu amor.

À minha família, mãe Alcione, pai Luir, irmãos Kézia e Daniel, à tia Luciene Goreti e minha avó Rita: obrigado por sempre serem meu combustível até aqui.

Não posso esquecer do profissional que foi base de minha formação acadêmica e profissional. Ao querido Fábio Zorzal, meu obrigado.

Aos mais que colegas de trabalho, mas sim parceiros do dia-a-dia, equipe Techvias Engenharia: minha gratidão por me permitirem construir um novo capítulo de nossas vidas profissionais.

Àqueles que me auxiliaram no desenvolvimento da modelagem com o SWAT, em norteamientos quanto à dissertação e enriquecimento de meus conhecimentos no campo de rechnursos hídricos. À Luana Lavagnoli, tutora que se tornou amiga e parceira de trabalho: grato pela paciência e compartilhamento de conhecimento. À Filipe Marvila, grato pelos ensinamentos e ajudas. Ao professor José Antônio Tosta dos Reis, obrigado por lencionar uma das melhores disciplinas cursadas por mim na UFES.

Aos que aceitaram contribuir e avaliar este trabalho: professor Lucien Akabassi e professora Edumar Ramos Cabral Coelho, gratidão pelo momento. Ao orientador e professor Daniel Rigo por valorosos direcionamentos nesta pesquisa, meu muito obrigado.

*Se não puder voar, corra.
Se não puder correr, ande.
Se não puder andar, rasteje,
mas continue em frente de qualquer jeito.*

Martin Luther King Jr

RESUMO

A necessidade de estimativa de vazões em bacias hidrográficas é uma problemática recorrente em estudos hidrológicos e no gerenciamento de recursos hídricos. Em específico, ao se voltar para as vazões mínimas de referências (Q_{90}), são encontradas metodologias para a determinação dos valores dessas, todavia esse caminho teórico é permeado de incertezas e trabalhosos esforços. Um dos diversos métodos de determinação de Q_{90} é de Eletrobrás, proposto em 1985 e que vem, desse então, sendo largamente utilizado em todo o território nacional. Não diferente à isso, no Espírito Santo autores como Euclides et al. (2007) e Ferreira (2010) aplicaram esse método para a bacia do Rio Timbuí, que consiste em um curso d'água de significativo comprimento e potencial de abastecimento humano, porém com apenas uma estação fluviométrica de monitoramento. Por outro lado, com o avanço tecnológico, métodos como o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) vêm sendo largamente utilizados para a determinação de vazões em diversas localidades, inclusive no Espírito Santo. Por isso, este trabalho buscou estudar comparativamente os resultados de Q_{90} obtidos através das equações de regionalização de vazões já desenvolvidas pelos autores citados outrora e àqueles oriundos da curva de permanência de vazões, estas obtidas através do SWAT com uma simulação não-calibrada, para uma região que englobasse o posto fluviométrico de Valsugana Velha-Montante (sub-bacia 115) e para um local mais próximo da foz do rio (sub-bacia 207), onde não havia monitoramento. O trabalho foi dividido em três etapas, sendo na primeira abordada a modelagem hidrológica com o SWAT, donde se apresentam os dados de entrada do modelo (variáveis climáticas, fisiográficas e fluviométricas), a análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo através dos valores de *p-value* e *t-stat* e as tentativas de calibração com obtenção de um Coeficiente de Nash-Sutcliffe igual a 0,17. A segunda etapa foi destinada à determinação da vazão Q_{90} com os dados modelados no SWAT, onde, neste item, abordou-se a distribuição das vazões simuladas entre o período de simulação (01/01/2007 a 31/12/2015) em uma curva de permanência da qual foi possível a determinação da vazão a qual se igualava ou era superada em 90% do tempo (Q_{90}). Por fim, na terceira etapa, as equações de Euclides et al. (2007) e Ferreira (2010) foram aplicadas para as duas bacias em estudo. No item seguinte à terceira etapa, foi percorrido comparativamente os valores obtidos pelas duas metodologias aplicadas onde se verifica forte divergência dos valores simulados pelo SWAT com os obtidos através das equações de regionalização para as sub-bacias. Essa medida de comparação foi realizada com o auxílio do Erro Relativo, método largamente utilizado para análises comparativas em modelos hidrológicos.

Palavras-chave: Produção de água. Vazões. SWAT. Vazões de referência. Q_{90} .

ABSTRACT

Estimating flows in hydrographic basins is a constant problem in hydrological studies and management of water resources. Specifically, when analysing the reference flow Q_{90} , several methodologies are found to determine these values, however, this theoretical path is surrounded by uncertainties and laborious efforts. Eletrobrás is one of the several methods of determination of Q_{90} . It was proposed in 1985 and it has been widely used throughout Brazil. In Espírito Santo authors such as Euclides et al. (2007) and Ferreira (2010) applied this method to the Timbuí River basin, which consists of a watercourse of significant length and potential for human supply, but it has only one stream gaging station. On the other hand, with the technological advance, methods such as SWAT (Soil and Water Assessment Tool) have been widely used to determine flows in several locations, including Espírito Santo. Therefore, this study aims to analyze the Q_{90} results obtained through the flow regionalization equations already developed by the authors cited previously and the results from the flow continuity curve obtained from SWAT with an uncalibrated simulation to a region that includes the Valsugana Velha-Montante fluviometric station (sub-basin 115) and to a location near the mouth of the river (sub-basin 207), where there was no monitoring. This study is divided into three steps, the first one is the hydrological modelling with SWAT, which presents the input data of the model (climatic, physiographic and fluviometric variables), the sensitivity analysis of the parameters of the model through the values of p-value and t-stat and the calibration attempts with a Nash-Sutcliffe Coefficient equal to 0.17. The second step is used to determine the Q_{90} flow rate with SWAT data, where the distribution of the simulated flows between the simulation period (01/01/2007 to 12/31/2015) in a which allowed the determination of the flow rate, which was equal to or exceeded 90% of the time (Q_{90}). Finally, in the third step, the equations of Euclides et al. (2007) and Ferreira (2010) were applied to the basins studied. As a conclusion, the values obtained by the two methodologies were compared and it was found that the values obtained by the SWAT simulation diverge from those obtained through the regionalization equations for the sub-basins. This comparative measure was performed with the aid of Relative Error, a method widely used for comparative analysis in hydrological models.

Key words: Water production. Flows. SWAT. Reference flows. Q_{90} .

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores dos coeficientes com relação ao desempenho da calibração para modelagem de produção de água.....	41
Tabela 2 - Média e Desvio padrão das temperaturas máximas diárias a cada mês (°C).....	55
Tabela 3 - Média e Desvio padrão das temperaturas mínimas diárias a cada mês (°C) (continua)	55
Tabela 4 - Média e Desvio padrão das temperaturas mínimas diárias a cada mês (°C) (conclusão)	56
Tabela 5 - Média e Desvio padrão da precipitação mensal total para o período (mm).....	56
Tabela 6 - Coeficiente Skew para a precipitação diária a cada mês	57
Tabela 7 - Probabilidade de um dia úmido seguir um dia úmido no mês	57
Tabela 8 - Probabilidade de um dia úmido seguir um dia úmido no mês	58
Tabela 9 - Média do número de dias com precipitação no mês	58
Tabela 10 – Relação entre as alturas pluviométricas	59
Tabela 11 - Precipitação máxima para meia hora de chuva em todo o período de registro para o mês (mm).....	59
Tabela 12 - Média da radiação solar diária para cada mês (MJ/m ² .dia).....	59
Tabela 13 - Média das temperaturas diárias de ponto de orvalho a cada mês (°C)	60
Tabela 14 - Média das velocidades de vento diárias para cada mês (m/s).....	60
Tabela 15 – Relação do tipo de solo da bacia em estudo	63
Tabela 16 – Classificação pedológica nos grupos hidrológicos de solo A, B, C e D (continua)	64
Tabela 17 – Classificação pedológica nos grupos hidrológicos de solo A, B, C e D (conclusão)	65
Tabela 18 - Valores de CN para usos e ocupações do solo para bacia do Rio Timbuí.....	72
Tabela 19 - Parâmetros da análise de sensibilidade relacionados à produção de água.....	76
Tabela 20 - Classificação da sensibilidade dos parâmetros	82
Tabela 21 - Categorização dos parâmetros quanto a sensibilidade	83
Tabela 22 - Resultado da vazão Q ₉₀ para equação de Ferreira (2010).....	96
Tabela 23 - Resultado da vazão Q ₉₀ para equação de Euclides et al. (2007)	97
Tabela 24 – Comparativos das vazões Q ₉₀	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do modelo SWAT	22
Figura 2 - Mapa de localização da bacia	53
Figura 3 -Mapa do Modelo Digital de Elevação (MDE) para bacia do Rio Timbuí.....	62
Figura 4 – Triângulo de classificação das classes texturais do solo, adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (Fonte: adaptado de SCS).....	66
Figura 5 - Mapa da Pedologia para bacia do Rio Timbuí	67
Figura 6 - Mapa dos Usos e Ocupações do Solo para bacia do Rio Timbuí.....	69
Figura 7 - Distribuição do uso e ocupação de solo na bacia	70
Figura 8 - Mapa com localização das Estações Fluviométricas (ANA) – Valsugana Velha-Montante.....	73
Figura 9 - Ilustração de formação das Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's)	74
Figura 10 - Resultado gráfico da análise de sensibilidade dos parâmetros (SWAT-CUP).....	82
Figura 11 - Mapa das sub-bacias oriunda do SWAT – Sub-bacias 115 e 207.....	85
Figura 12 – Hietograma e série de dados de vazão média diária estimada e monitorada para a sub-bacia 115.....	87
Figura 13 - Correlação entre vazões estimadas (SWAT) e vazões monitoradas	90
Figura 14 - Hietograma e série de dados de vazão média diária estimada e monitorada para a sub-bacia 207.....	92
Figura 15 - Curva de Permanência para sub-bacia 115.....	94
Figura 16 - Curva de Permanência para sub-bacia 207.....	94

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 BALANÇO HÍDRICO.....	17
3.2 VAZÕES MÍNIMAS DE REFERÊNCIA	18
3.2.1 Curvas de Permanência	19
3.2.2 Método de determinação da vazão de referência Q_{90}	20
3.3 MODELOS HIDROLÓGICOS	20
3.4 MODELO SWAT	21
3.4.1 Balanço Hídrico no SWAT	23
3.4.2 Produção de água no SWAT	24
3.4.2.1 Escoamento Superficial	24
3.4.2.2 Taxa de Escoamento de Pico	25
3.4.2.3 Tempo de Concentração	26
3.4.2.4 Retardo do Escoamento Superficial.....	29
3.4.2.5 Escoamento Lateral.....	30
3.4.2.6 Armazenamento no Dossel	31
3.4.2.7 Evapotranspiração Potencial.....	31
3.4.2.8 Água No Solo.....	32
3.4.2.8.1 Percolação	32
3.4.2.8.2 Água Subterrânea	33
3.4.2.8.3 Recarga do Aquífero	34
3.4.2.8.4 Escoamento de Base.....	35
3.4.2.8.5 Capilaridade	35
3.4.2.8.6 Percolação para o Aquífero Profundo.....	36
3.4.2.9 Propagação no reservatório.....	37
3.4.2.10 Propagação no canal	37
3.4.3 Análise de Sensibilidade	39
3.4.4 Calibração.....	40
3.4.5 Trabalhos desenvolvidos no SWAT.....	42

3.5	REGIONALIZAÇÃO DE VAZÃO.....	43
3.5.1	Variáveis relevantes para regionalização hidrológica.....	44
3.5.2	Métodos de Regionalização de Vazão	46
3.5.2.1	Método Eletrobrás (1985) – baseado em equações de regressões regionais 46	
3.5.2.1.1	<i>Trabalhos desenvolvidos para a região em estudo</i>	47
4.	METODOLOGIA.....	51
4.1	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA.....	51
4.2	ÁREA DE ESTUDO.....	52
4.2.1	Bacia do Rio Timbuí	52
4.3	PRIMEIRA ETAPA: MODELAGEM HIDROLÓGICA COM USO O SWAT ...	54
4.3.1	Coleta de dados existentes.....	54
4.3.1.1	Variáveis Climáticas	54
4.3.1.2	Variáveis fisiográficas	60
4.3.1.2.1	<i>Modelo Digital de Elevação (MDE)</i>	60
4.3.1.2.2	<i>Pedologia</i>	63
4.3.1.2.3	<i>Usos e Ocupações do Solo</i>	68
4.3.1.3	Variáveis fluviométricas	72
4.3.2	Aplicação do modelo SWAT	74
4.3.3	Análise de Sensibilidade	75
4.3.4	Calibração.....	78
4.4	SEGUNDA ETAPA: DETERMINAÇÃO DA VAZÃO Q ₉₀ COM DADOS MODELADOS NO SWAT	79
4.5	TERCEIRA ETAPA: DETERMINAÇÃO DA VAZÃO Q ₉₀ COM EQUAÇÕES DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES	79
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
5.1.	RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA: Vazões estimadas pelo SWAT	81
5.1.1.	Análise de sensibilidade.....	82
5.1.2.	Calibração	83
5.1.3.	Vazões estimadas pelo SWAT.....	84
5.1.3.1.	Sub-Bacia 115	86
5.1.3.2.	Sub-Bacia 207	91
5.2.	RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA: Determinação das Vazões Mínimas de Referência (Q₉₀) com dados modelados pelo SWAT	93

5.3. RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA: Determinação das Vazões Mínimas de Referência (Q₉₀) através de equações de regionalização.	96
5.4. Análise comparativa dos resultados.....	97
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	100
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural que apresenta os mais variados usos, sendo indispensável ao desenvolvimento humano. Porém, o gerenciamento deste recurso finito em padrões de qualidade e quantidade com o objetivo de atendimento a suas diversas finalidades representa um desafio para a sociedade (SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010).

Por isso, as vazões mínimas, ou seja, os menores valores da série de vazões de um determinado ponto, desempenham um papel primordial quanto a disponibilidade mínima à retirada de forma sustentável. Segundo Pereira e Lanna (1996) quando se lança mão das vazões mínimas para o gerenciamento dos recursos hídricos há a garantia de disponibilidade ainda que em períodos de estiagem, fazendo com que a probabilidade de falhas no sistema de abastecimento diminua.

Com base na Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída em 1997 (BRASIL, 1997), a outorga de direito de uso dos recursos hídricos é um dos instrumentos mais importantes para a gestão da água. Ela prevê como objetivo assegurar o controle dos usos da água de forma racional a fim de que se adeque as demandas e disponibilidades, possibilitando uma distribuição mais justa e equilibrada do recurso a todos os usuários e, conseqüentemente, minimizando conflitos de interesses (BRASIL, 1997; ANA, 2015).

Posto isso, é notório que o estudo das vazões mínimas de referência subsidia a utilização das mais diversas formas e usos dos recursos e é uma ferramenta indispensável para o desenvolvimento sustentável de uma nação. Especificamente no Brasil, entre os anos de 1960 e 1980, geralmente as demandas estavam associadas aos grandes aproveitamentos ou projetos, sobretudo, àqueles do setor de geração de energia elétrica localizados em grandes bacias hidrográficas. Supõe-se, por isso, que o direcionamento de investimento ao monitoramento dos cursos d'água através de estações fluviométricas foi voltado à essas bacias (PAIVA; PAIVA, 2003).

Não obstante, com o crescente adensamento demográfico e falta de investimentos em proteções dos recursos naturais, a demanda passou a superar, em diversas vezes, a oferta, principalmente quanto ao abastecimento humano. Por consequência, isso passou a criar a necessidade de exploração de cursos d'água de bacias consideradas pequenas e em áreas próximas à população. Em específico, para pequenas bacias hidrográficas, a deficiência em dados é o fator preponderante para seu estudo mais aprofundado (BESKOW; NORTON; MELLO. 2013). Para tais a regionalização hidrológica é uma ferramenta importante para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Os modelos de regionalização de vazões buscam realizar a transferência de informações de um lugar para outro, considerando essas áreas hidrologicamente homogêneas.

Segundo a Agência Nacional de Água – ANA, a regionalização de vazões é caracterizada por uma gama de métodos que utilizam informações regionais para sintetizar dados de vazão, ou seja, utilizam informações existentes para estimar vazões de referência em locais sem dados, com base em variáveis explicativas como área de drenagem e precipitação e considerando a similaridade espacial dos parâmetros hidrológicos.

Diversos pesquisadores têm publicado obras quanto a regionalização de vazões mínimas de referência e, com isso, contribuído para o campo de aperfeiçoamento dessa técnica tão necessária aos estudos hidrológicos e gerenciamento dos recursos hídricos.

No estado do Espírito Santo é possível encontrar diversas bacias hidrográficas carentes de informações fluviométricas de seus cursos d'água e, conseqüentemente, deficitárias quanto a um estudo aprofundado da disponibilidade hídrica. Na porção central desse estado destaca-se a bacia do Rio Timbuí que contém apenas uma estação com pouco mais de 30 anos de monitoramento – a estação de Valsugana Velha-Montante.

Muito embora monitorada, a bacia carece de dados quando o curso do rio se aproxima do oceano, pois aquela estação está localizada no município de Santa Teresa, a aproximadamente 40 km do exutório da bacia que localiza-se entre os municípios de Serra e Fundão. Por esse motivo, quaisquer necessidades de conhecimento das vazões nessa região devem partir de métodos empíricos.

Estudos como o de Coser (2003), Euclides et al. (2007) e Ferreira (2010) abordam a estação fluviométrica de Valsugana Velha-Montante em uma delimitação de área de influência e, conseqüentemente, equações de regionalização de vazão. Essas equações relacionam como variável área, comprimento do rio principal e declividade da bacia à uma resposta de vazão mínima de referência – Q_{90} , para o caso de Euclides et al. (2007) e Ferreira (2010) ou $Q_{7,10}$, para o caso de Coser (2003).

Por outro lado, atualmente são abrangentes os modelos hidrológicos de estimativa de vazões em bacias hidrográficas que podem, em um segundo momento, serem tratados a fim de se obter vazões mínimas de referência.

Nesse contexto, uma ferramenta que tem auxiliado na modelagem hidrológica é o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), que consiste em um modelo matemático de parâmetro distribuído, o qual permite diversas simulações de processos físicos em bacias hidrográficas, com a finalidade de analisar os impactos das alterações do uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo das águas, bem como sua qualidade e a produção de sedimentos.

Além disso, por conta do SWAT trabalhar num ambiente de Sistema de Informações Geográfica (SIG) o processo de modelagem torna-se mais preciso e rápido, garantido a confiabilidade e possibilidade de testes.

A modelagem SWAT foi realizada para a bacia do Rio Timbuí, que apresenta área de 666,4 km² e caracterizada por grandes variações, principalmente na declividade e usos e ocupações de solo. Por conseguinte, com os dados modelados em função do tempo é possível a obtenção dos valores de Q_{90} , por exemplo, em qualquer ponto da bacia através de curvas de permanência. Dessa forma, a proposta deste trabalho consiste em analisar e comparar criticamente as respostas de vazões mínimas de referência (Q_{90}) obtidas através de fontes distintas: (i) de equações existentes na bibliografia de regionalização de vazões e (ii) àquelas oriundas da modelagem com o SWAT para o Rio Timbuí em dois pontos da bacia.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar vazões mínimas de referência (Q_{90}) obtidas através da curva de permanência com dados oriundos do modelo SWAT e aquelas obtidas através de equações de regionalização.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Realizar a modelagem hidrológica da bacia do Rio Timbuí com uso do SWAT, visando à determinação de vazões mínimas de referência em ao menos duas seções de estudo;
- 2) Aplicar as equações de regionalização de vazões da bibliografia existente para ao menos duas seções da bacia do Rio Timbuí;
- 3) Avaliar os resultados das vazões obtidas através do modelo SWAT com dados da série histórica (monitorada), analisando as diversas características da bacia.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BALANÇO HÍDRICO

O estudo do balanço hídrico deve ser considerado como um método de investigação das transformações do ciclo hidrológico em seus diversos setores em relação aos sistemas hidrológicos terrestres (DASSIE, 2001).

O ciclo hidrológico é descrito por Silveira (1997) como um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, sendo impulsionado pela energia solar associada à gravidade e à rotação da Terra. Todavia, em perspectiva disso observa-se que o ciclo hidrológico somente é válido quando considerado ao nível global.

De uma forma mais restrita, Fill (1987) faz um destaque para a chamada parte terrestre do ciclo hidrológico, onde a atmosfera e os oceanos são substituídos por condições de contorno adequadas. Dessa forma, a maior vantagem desse modelo é que a atenção pode ser voltada à uma extensão limitada da terra – uma bacia hidrográfica, por exemplo, que constitui a unidade espacial da hidrologia.

Para Tucci e Beltrame (1997), o balanço hídrico abrange a conservação da massa e troca de energia dos sistemas envolvidos em função de tempo e espaço, sendo composto por variáveis como precipitação, evapotranspiração, evaporação ou escoamento superficial e subterrâneo.

Nesse contexto, o balanço hídrico pode ser entendido como computação das entradas e saídas de água do sistema, que neste caso é o próprio ciclo hidrológico, cujo o resultado fornecerá a água disponível no sistema, ou seja, no solo, rios, lagoas, vegetação e oceanos. Além disso, o balanço hídrico é um componente importante no conjunto de estratégias do gerenciamento de recursos hídricos, norteando, por exemplo, estudos de captação de águas para abastecimento humano.

Não diferente de outras tentativas de representação da realidade, as equações de balanço hídrico existentes estão sujeitas a erros de medições nos dados de entrada e, portanto, podem incluir uma parcela residual de discrepância (DASSIE, 2001). Por isso, a complexidade da análise do balanço hídrico está diretamente ligada ao valor de área da bacia influente no corpo hídrico.

De forma a auxiliar no entendimento do balanço hídrico os modelos hidrológicos representam uma ferramenta essencial em estudo dessa natureza.

3.2 VAZÕES MÍNIMAS DE REFERÊNCIA

Sant'ana, Fior e Kaviski (1989) consideram que em um hidrograma (representação gráfica de vazão em função do tempo) as vazões mínimas são aquelas correspondentes aos trechos que apresentam uma diminuição lenta do escoamento, devido à contribuição subterrânea.

Já para Tucci (2002) as vazões mínimas, também chamadas de vazões de estiagem, são aquelas que em uma dada série histórica, apresentam os menores valores da referida série ou que não atendem às necessidades demandadas. Apesar disso, o autor ainda considera que essa definição é cercada de subjetividade em virtude da vazão mínima não ser caracterizada a partir de um valor da série histórica, além do fato de que um rio, em período de cheias, pode não ser suficiente no atendimento da demanda da área que abastece.

O conhecimento das vazões mínimas, tanto em magnitude quanto em frequência, é importante para o planejamento da água, destacando-se os projetos de abastecimento de água, de armazenamento em reservatórios, além de manutenção da quantidade e qualidade de água para a agricultura, recreação e conservação da vida selvagem (SMAKHTIN, 2001).

Na área de estudo de gerenciamento de recursos hídricos, uma das principais aplicações da regionalização de vazões refere-se a estimativa de vazões mínimas que possam ser utilizadas como “vazões de referência” (PEREIRA, 2012).

Segundo Sousa (2009), a vazão de referência é baseada usualmente na vazão mínima com 7 dias consecutivos de duração e 10 anos de período de retorno ($Q_{7,10}$), ou na vazão mínima com 90 (Q_{90}) ou 95% (Q_{95}) de permanência no tempo, que pode ser obtida a partir da curva de permanência das vazões monitoradas em uma estação fluviométrica. Essa curva de permanência, também dita como curva de duração, é a ferramenta mais utilizada atualmente para a determinação da disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas, basicamente por conta da sua representatividade em períodos de estiagens (CRUZ, 2001).

Na construção da curva de permanência é possível afirmar o valor máximo da vazão tem a probabilidade de ser igualado ou superado igual ao inverso do número de dados registrados. Logo, a cada um desses dados é atribuída a probabilidade de excedência. Quando essa probabilidade supera os 90% ou 95% de ocorrência é chamada de vazão Q_{90} ou Q_{95} , respectivamente.

Quanto para a vazão $Q_{7,10}$, segundo Paulo (2007), a obtenção pode ser realizada computando-se as médias móveis das vazões médias diárias com janelas de 7 dias ao longo de um ano. A mínima dessas médias móveis é retida. Esse processo se repete para cada ano da série histórica com o objetivo de obter-se uma série de valores mínimos de vazões médias de 7 dias consecutivos. Por conseguinte, essas vazões são ordenadas em ordem crescente de magnitude,

onde são estimadas suas Funções de Distribuição e períodos de retorno. Desta função de distribuição é possível estimar a vazão mínima de 7 dias de duração com período de retorno de 10 anos. Uma das vantagens desse modelo é que não requer qualquer trabalho de campo, a não ser a medida sistemática da vazão ao longo da série.

Um uso largamente praticado de vazões de referência é em processos de outorga de recursos hídricos. Nesse interim, o Instituto Estadual de Meio Ambiente do estado do Espírito Santo (IEMA), responsável pelo processo de outorga, instituiu através da Instrução Normativa nº 13, de dezembro de 2009 a utilização da vazão Q_{90} em processos desse gênero para todo o território capixaba.

Para se alcançar o entendimento da aplicação prática de vazões mínimas de referência é preciso conceituar as curvas de permanência, bem como a regionalização de vazões através desta. Isso será posto adiante.

3.2.1 Curvas de Permanência

Por definição, a curva de permanência, ou curva de duração, relaciona a vazão e a porcentagem do tempo em que ela é superada ou igualada em um intervalo de tempo utilizada para sua construção. Sucintamente pode ser entendida como uma forma gráfica de representar a probabilidade de excedência de vazões em função do tempo (QUIMPO; MCNALLY, 1983; VOGUEL; FENNESSEY, 1994).

São antigos os históricos do uso de curvas de permanência em estudos voltados às bacias hidrográficas. Searcy (1963), em suas pesquisas, afirma que a presença de angulações mais acentuadas nas curvas de permanência indica o fluxo altamente variável, com predominância do escoamento direto, enquanto, por outro lado, angulações mais suaves indicam a presença de armazenamento de água na superfície ou no aquífero da bacia, que tendem a equalizar as vazões. Em suma, quanto mais inclinada a curva de permanência, menor a capacidade de armazenamento de água na bacia e, quanto menos inclinada essa curva a capacidade de armazenamento tende a ser maior.

As curvas de permanência proporcionam o uso de vazões mínimas de referência quando em estudos em áreas onde não há dados medidos de vazões, ou esses são deficitários. Por esse motivo, a regionalização de vazões de referência é uma técnica largamente utilizada e de alta importância pelo fato de, segundo Eletrobrás (2000), apresentar resultados satisfatórios.

3.2.2 Método de determinação da vazão de referência Q_{90}

Segundo Von Sperling (2014) a vazão de referência Q_{90} pode ser obtida através das curvas de permanência das vazões.

Para o cálculo de Q_{90} deve-se utilizar toda a série histórica dos dados, compreendendo as medições diárias (N = total de dados). O primeiro passo é classificar os dados em ordem decrescente, e atribuir um número de ordem para cada um, na sequência decrescente onde $m=1$ para o maior, $m=2$ para o segundo maior e assim por diante, até que $m=N$, ou seja, para o menor valor.

O segundo passo é atribuir uma probabilidade (P) de ocorrência para cada vazão ordenada onde ela possa ser superada. Esta probabilidade é dada por $P=m/N$. Logo, para a maior vazão da série, onde $m=1$, a probabilidade de ocorrência de uma vazão superior a ela é igual a $1/N$, a segunda maior $2/N$ e assim por diante, até que para o menor valor seja atribuída uma probabilidade $m=N/N$, ou seja igual a 1 (100%).

O terceiro passo é buscar o valor de probabilidade mais próximo de 0,90 (90% para Q_{90}), no qual se levanta a vazão associada que refletirá no resultado de que 90% das vazões da série de dados são iguais ou superiores a ela.

3.3 MODELOS HIDROLÓGICOS

Para Tucci (1998a) a hidrologia abrange diversos fenômenos complexos do ciclo hidrológico. Processos como a precipitação, evaporação, infiltração e o escoamento em rios estão diretamente ligados a uma série de fatores o que acarreta em dificuldades nas análises qualitativas e quantitativas.

O principal problema da hidrologia aplicada é a determinação de vazões em um rio, o qual sofre influência, dentre outros, de variáveis climáticas, como a precipitação, temperatura, vento, etc. Os processos que ligam as chuvas às vazões são, em sua essência, determinísticos. Todavia, as condições de entorno complexas, como a fisiografia, fazem com que os caminhos de soluções baseados na aplicação direta das leis da física sejam, praticamente, inalcançáveis (RAUDKIVI, 1979).

Dessa forma surgiram modelos capazes de darem respostas a uma extensa lista de objetivos, tais como prever a frequência de eventos, fazer previsões de curto prazo, extensão de séries, previsão do comportamento hidrológico da bacia, previsão dos efeitos de mudanças físicas na bacia e a otimização do planejamento e procedimentos operacionais de projetos de recursos hídricos.

Para Tucci (1998b), modelo hidrológico consiste em uma ferramenta que tem por objetivo entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica, bem como prever condições de eventos. Nesse contexto, o modelo não deve ser o objetivo da pesquisa, mas sim uma ferramenta a ser utilizada para alcançar o objetivo proposto.

Segundo Beven (2001), o maior motivador de usos de modelos hidrológicos é a limitação das técnicas de medição. Devido a essas limitações, ainda não é possível, humanamente, medir todas as variáveis do ciclo hidrológico.

Quanto à classificação, os modelos hidrológicos podem ser estocásticos ou determinísticos, em função do tipo de variáveis utilizadas na modelagem; empíricos ou conceituais, de acordo com o tipo de relações entre essas variáveis; concentrados ou distribuídos, conforme a existência ou não de relações espaciais (RENNÓ; SOARES, 2000).

Um dos modelos hidrológicos mais utilizados atualmente é o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), dada sua fácil interação no ambiente SIG.

3.4 MODELO SWAT

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) consiste em um modelo eco-hidrológico desenvolvido para simular o impacto de práticas de manejo de terras do ponto de vista de produção de água, sedimentos e químicos agrícolas em grandes bacias com tipo e uso de solos variados e condições de manejo durante longos períodos de tempo (ECKHARDT; FOHRER; FREDE, 2005).

O modelo SWAT assume a forma distribuída, ou seja, tem as suas variáveis e parâmetros em função do espaço e do tempo (SOUZA, 2011). Segundo Tucci (1998b), a maior vantagem desse modelo é a possibilidade de representar a variação espacial do sistema, sendo o SWAT capaz de realizar simulações de vazões considerando, além das séries temporais, diversos fatores espaciais como relevo, hidrografia, pedologia e uso do solo.

A figura a seguir apresenta os processos do modelo SWAT de forma sistemática quanto à produção de água na bacia.

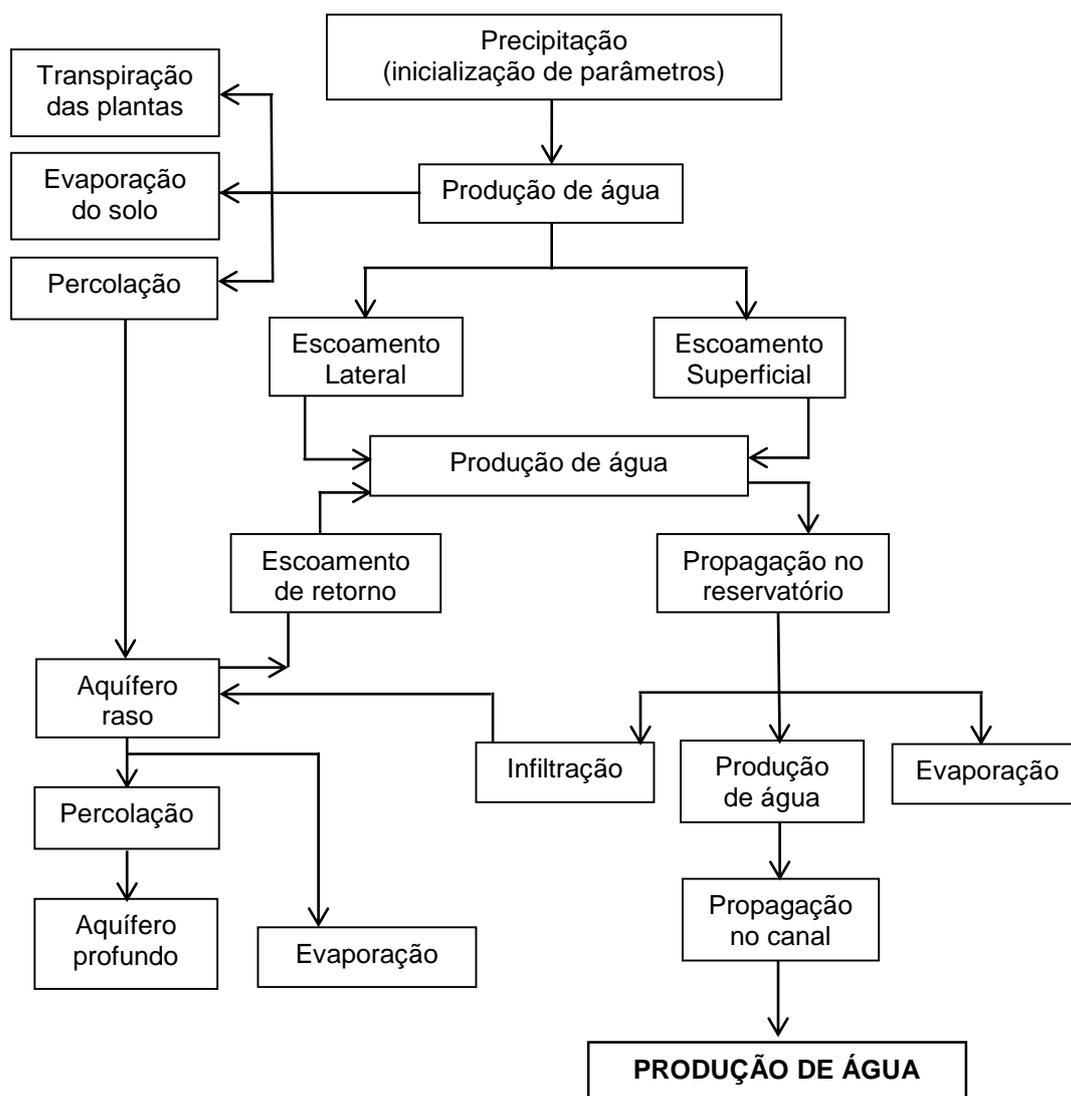


Figura 1 - Fluxograma do modelo SWAT

Fonte: Adaptado de Souza (2011)

Outra forte vantagem do modelo SWAT é a sua integração com o Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcMap permitindo praticidade na manipulação de dados de entrada e possibilitando representar a heterogeneidade existentes nos sistemas modelados de topografia e cobertura do solo, o que torna uma melhor representação espacial da variabilidade de características de uma determinada bacia hidrográfica (ARROIO JÚNIOR, 2013).

Assumindo o tipo de modelo distribuído, o SWAT permite que a bacia em estudo seja particionada em sub-bacias. Basicamente essa divisão assume duas etapas distintas: a primeira consiste na divisão da bacia em sub-bacias levando em consideração a topografia, ou seja, a delimitação da bacia hidrográfica através do contorno de divisores de águas; após isso, em uma segunda etapa, cada sub-bacia criada na primeira etapa é dividida em várias Unidades de Resposta Hidrológica, ou, como mais comumente conhecidas HRU's (*Hydrologic Response*

Units), que consistem na representação de uma combinação única de tipo de solo e tipo de cobertura superficial da bacia (BOURAOUI et al., 2005).

Sob outra ótica, HRU's podem ser entendidas como um aglomerado de pixels que possuem características idênticas quanto à vegetação, tipo de solo, uso e ocupação do solo e às condições meteorológicas e hidrológicas (TESH, 2015).

3.4.1 Balanço Hídrico no SWAT

De acordo com Neitsch, et al. (2005), o ciclo hidrológico é dividido em duas etapas: a primeira ocorrendo na encosta, ou seja, diretamente no solo, sendo simulada a quantidade de água, sedimentos, nutrientes e inseticidas que serão carregados para o rio principal em cada sub-bacia; por sua vez, a segunda etapa ocorre diretamente nos corpos d'água, sendo caracterizada pela dinâmica da água, dos sedimentos, dentre outros, ao longo de toda a rede hidrográfica, até que se encontre o exutório da bacia.

No SWAT são considerados processos hidrológicos inerentes à interceptação das gotas de chuva pelo dossel da vegetação ou contato direto na superfície do solo. Com isso, segmenta-se a parcela infiltrada no solo daquela que se torna escoamento superficial imediato. Esta água do escoamento superficial se move relativamente rápido até encontrar os corpos d'água, já a parcela que infiltra, por sua vez, pode ficar retida no solo até que ocorra um processo de evapotranspiração ou escoamento através de movimentos hídricos subterrâneos (NEITSCH, et al., 2005).

A equação do balanço hídrico seguindo essa forma de concepção do modelo SWAT pode ser expressa (ARNOLD, et al., 1998; NEITSCH, et al., 2011):

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

Onde:

SW_t = quantidade final de água no solo, em mm;

SW_0 = quantidade inicial de água no solo no dia i , em mm;

t = duração do ciclo hidrológico simulado, em dias;

R_{day} = quantidade de precipitação no dia i , em mm;

Q_{surf} = quantidade de escoamento superficial no dia i , em mm;

E_a = quantidade de evapotranspiração no dia i , em mm;

w_{seep} = quantidade de água que percola da camada simulada para a camada inferior, no dia i , em mm;

Q_{gw} = quantidade de água que retorna ao curso d'água no dia i devido ao escoamento sub-superficial, em mm.

3.4.2 Produção de água no SWAT

O modelo SWAT utiliza de fórmulas matemáticas para a determinação do que a literatura chama de produção de água. Isso acontece em cada processo hidrológico com o objetivo de estimar a vazão na seção estudada. A seguir são apresentadas as principais equações segundo Santos et al. (2005) e Neitsch et al. (2011).

3.4.2.1 Escoamento Superficial

Para simular o escoamento superficial o SWAT utiliza, nas simulações diárias, o método da Curva Número (CN) proposto pelo *Soil Conservation Service* (SCS). Por mais de vinte anos foram realizadas pesquisas envolvendo a relação chuva-vazão em pequenas bacias rurais do Estados Unidos até que na década de 1950 a equação, fruto desse trabalho, começou a ser utilizada.

O método busca estimar o volume de escoamento superficial com base na pedologia e uso do solo, e pode ser expressão pela equação a seguir:

O parâmetro de retenção é obtido pela seguinte Equação 2:

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

Onde:

Q_{surf} = escoamento superficial diário, em mm;

R_{day} = precipitação diária, em mm;

I_a = abstração inicial em mm, que inclui o armazenamento de superfície, interceptação e infiltração antes do escoamento;

S = parâmetro de retenção, em mm, o qual tem variação espacial devido às mudanças nos solos, uso do solo, manejo e declividade e variação temporal devido às mudanças na umidade do solo. Tal parâmetro é definido pela seguinte Equação 3:

$$S = 25,4 \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

Onde:

CN = curva número diária.

A abstração inicial é comumente aproximada para $0,2S$, levando a Equação 2 à seguinte forma:

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{day}} - 0,2S)^2}{(R_{\text{day}} + 0,8S)} \quad (4)$$

O escoamento superficial somente ocorrerá quando $R_{\text{day}} > I_a$.

O SCS definiu três condições de umidade antecedente para a curva número.

- CN1 = condição um de umidade, na qual os solos estão secos;
- CN2 = condição dois de umidade, onde se têm umidade média, na qual os solos apresentam umidade da capacidade de campo;
- CN3 = condição três de umidade, situação onde os solos estão saturados.

O modelo assume a condição de umidade dois para o início da simulação.

3.4.2.2 Taxa de Escoamento de Pico

A taxa de escoamento de pico pode ser entendida como contribuição de escoamento superficial máximo que pode ocorrer em um evento de precipitação. No SWAT essa taxa é calculada através o método racional modificado.

Conceitualmente o método racional pressupõe que se uma chuva de intensidade i inicia-se no tempo igual a zero ($t=0$) e se estende indefinidamente, a taxa de escoamento irá aumentar até o tempo de concentração, ou seja, na condição $t=t_{\text{conc}}$, o que acarreta na contribuição de toda a área da sub-bacia para a vazão. A equação do método racional é dada por:

$$q_{\text{peak}} = \frac{C \cdot i \cdot \text{Área}}{3,6} \quad (5)$$

Onde:

q_{peak} = taxa de escoamento superficial, em m^3/s ;

C = coeficiente de escoamento;

i = intensidade da chuva, em mm/h ;

Área = área da sub-bacia, em km^2 ;

3,6 = fator de conversão de unidades.

Existem diversas variações do método racional do tipo geral. No caso do método racional modificado o mesmo sofre a inserção de um multiplicador denominado coeficiente de retardo que pondera a permanência do escoamento na sub-bacia. A Equação 6, que rege esse fenômeno, é descrita a seguir:

$$q_{peak} = \frac{a_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot Area}{3,6 \cdot t_{conc}} \quad (6)$$

Onde:

a_{tc} = fração do escoamento diário que ocorre durante o tempo de concentração;

Q_{surf} = escoamento superficial, em mm;

t_{conc} = tempo de concentração para a sub-bacia, em horas.

3.4.2.3 Tempo de Concentração

O período de tempo que decorre desde o início da chuva até o momento no qual toda a área da bacia está contribuindo para a vazão é tido como tempo de concentração. Essa variável está diretamente ligada ao tamanho da bacia e é obtida através da Equação 7:

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad (7)$$

Onde:

t_{conc} = tempo de concentração para a sub-bacia, em horas;

t_{ov} = tempo de concentração do escoamento superficial, em horas;

t_{ch} = tempo de concentração do escoamento do canal até a saída da bacia, em horas.

O tempo de concentração do escoamento superficial é dado pela Equação 8:

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}}{3600 \cdot v_{ov}} \quad (8)$$

Onde:

L_{slp} = comprimento da rampa de declividade da bacia, em m;

v_{ov} = velocidade do escoamento superficial, em m/s;

3600 = fator de conversão de unidade.

A velocidade do escoamento superficial é estimada pela equação de Manning, considerando uma faixa de um metro de largura na superfície inclinada, conforme a Equação 9:

$$V_{ov} = \frac{q_{ov}^{0,4} \cdot slp^{0,3}}{n^{0,6}} \quad (9)$$

Onde:

q_{ov} = taxa média de escoamento superficial, em m³/s;

slp = declividade média na sub-bacia, em m/m;

n = coeficiente de rugosidade de Manning para a sub-bacia.

Então, assume-se que a taxa média de escoamento é 6,35 mm/h e convertem-se as unidades, conforme mostra a Equação 10:

$$V_{ov} = \frac{0,005 \cdot L_{slp}^{0,4} \cdot slp^{0,3}}{n^{0,6}} \quad (10)$$

Substituindo a Equação 10 na Equação 8, têm-se:

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0,6} \cdot n^{0,6}}{18 \cdot slp^{0,3}} \quad (11)$$

O tempo de concentração no canal é dado pela Equação 12:

$$t_{ch} = \frac{L_c}{3,6 \cdot v_c} \quad (12)$$

Onde:

L_c = comprimento médio do canal para a sub-bacia, em km;

v_c = velocidade média no canal, em m/s;

3,6 = fator de conversão de unidade.

O comprimento médio do canal é estimado pela Equação 13:

$$L_c = \sqrt{L \times L_{cen}} \quad (13)$$

Onde:

L = comprimento do canal do ponto mais distante até o exutório da sub-bacia, em km;

L_{cen} = distância do canal para o centroide da sub-bacia em km. Assumindo que $L_{cen} = 0,5 \cdot L$,

o comprimento médio do canal é:

$$L_c = 0,71 \times L \quad (14)$$

A velocidade média é estimada pela equação de Manning assumindo um canal trapezoidal, conforme a Equação 15:

$$v_c = \frac{0,489 \cdot q_{ch}^{0,25} \cdot slp_{ch}^{0,375}}{n^{0,75}} \quad (15)$$

Onde:

v_c = velocidade média no canal, em m/s;

q_{ch} = taxa média de escoamento do canal, em m³/s;

slp_{ch} = declividade do canal, em m/m;

n = coeficiente de rugosidade de Manning para o canal.

Definindo a taxa de escoamento médio do canal na unidade de mm/h, é utilizada a Equação 16:

$$q_{ch} = \frac{q_{ch}^* \times Area}{3,6} \quad (16)$$

Onde:

q_{ch}^* = taxa média de escoamento no canal, em mm/h;

Area = área da sub-bacia, em km²;

3,6 = fator de conversão de unidade.

A taxa média de escoamento no canal é relacionada com a taxa de vazão para unidade de área fonte de vazão (unidade de área fonte de vazão = 1 ha), conforme segue:

$$q_{ch}^* = q_0^* (100 \cdot Area)^{-0,5} \quad (17)$$

Onde:

q_0^* = unidade de área fonte de vazão, em mm/h;

Area = área da sub-bacia, em km²;

100 = fator de conversão de unidades.

Assumindo que a unidade de área fonte de vazão é 6,35 mm/h e substituindo as Equações 16 e 17 na Equação 15, têm-se:

$$V_c = \frac{0,317 \cdot Area^{0,125} \cdot slp_{ch}^{0,375}}{n^{0,75}} \quad (18)$$

Substituindo as Equações 14 e 18 na Equação 12, têm-se:

$$t_{ch} = \frac{0,62 \cdot L \cdot n^{0,75}}{Area^{0,125} \cdot slp_{ch}^{0,75}} \quad (19)$$

Onde:

t_{ch} = tempo de concentração da vazão no canal, em horas;

L = comprimento do canal do ponto mais distante até o exutório da sub-bacia, em km;

n = coeficiente de rugosidade de Manning para o canal;

$Area$ = área da sub-bacia, em km²;

slp_{ch} = declividade do canal, em m/m.

3.4.2.4 Retardo do Escoamento Superficial

Em grandes sub-bacias, com um tempo de concentração superior a um dia, apenas uma parte do escoamento superficial atinge o canal principal no dia que é gerado. O SWAT utiliza de um recurso de armazenamento de escoamento superficial a fim de retardar a liberação de parte desse escoamento para o canal principal.

A quantidade de escoamento liberada para o canal principal pode ser calculada através da Equação 20:

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) \cdot \left(1 - \exp\left[-\frac{surlag}{t_{conc}}\right]\right) \quad (20)$$

Onde:

Q_{surf} = quantidade de escoamento superficial liberada para o canal principal em um dia qualquer, em mm;

Q'_{surf} = quantidade de escoamento superficial gerada em uma bacia em um dia qualquer, em mm;

$Q_{stor,i-1}$ = escoamento superficial armazenado ou atrasado do dia anterior, em mm;

$surlag$ = atraso do escoamento superficial;

t_{conc} = tempo de concentração para a bacia, em horas.

3.4.2.5 Escoamento Lateral

Em áreas que tenham solos com alta condutividade hidráulica nas camadas superficiais e com camadas impermeáveis ou semipermeáveis, o escoamento lateral pode apresentar grande significância.

O escoamento lateral de saída é calculado através da Equação 21 a seguir:

$$Q_{lat} = 24 \times H_0 \times v_{lat} \quad (21)$$

Onde:

Q_{lat} = escoamento lateral de saída, em mm/dia;

H_0 = espessura da camada saturada do comprimento de rampa, em mm/mm;

v_{lat} = velocidade do escoamento de saída, em mm/h.

A projeção da espessura da camada saturada do comprimento de rampa é dada por:

$$H_0 = \frac{2 \times SW_{ly,excess}}{1000 \times \phi_d \times L_{hill}} \quad (22)$$

Onde:

$SW_{ly,excess}$ = volume drenável na zona saturada, em mm;

ϕ_d = porosidade drenável do solo;

L_{hill} = comprimento de rampa, em m.

A velocidade de saída é calculada pela Equação 23:

$$v_{lat} = K_{sat} \times \sin(a)_{hill} \quad (23)$$

Onde:

V_{lat} = velocidade de saída;

K_{sat} = condutividade hidráulica saturada, em m/h;

a_{hill} = ângulo de inclinação da encosta;

$\sin(a_{hill})$ = declividade da encosta, slp, em m/m.

Então ao substituir as Equações 22 e 23 na Equação 21, tem-se:

$$Q_{lat} = 0,024 \times \frac{2SW_{ly,excess}K_{sat}slp}{\phi_d L_{hill}} \quad (24)$$

3.4.2.6 Armazenamento no Dossel

O armazenamento de água no dossel, ou seja, no extrato superior da vegetação florestal, afeta diretamente a infiltração no solo, o escoamento superficial e a evapotranspiração.

No SWAT, a quantidade máxima de água que pode ser retida no dossel pode variar ao longo dos dias, em função do índice de área foliar e expresso pela Equação 25 a seguir:

$$\text{can}_{\text{day}} = \text{can}_{\text{mx}} \times \frac{\text{LAI}}{\text{LAI}_{\text{mx}}} \quad (25)$$

Onde:

can_{day} = quantidade máxima de água que pode ser retida nas copas em um dia qualquer, em mm;

can_{mx} = quantidade máxima de água que pode ser retida nas copas quando o dossel está totalmente desenvolvido, em mm;

LAI = índice de área foliar para um dia qualquer;

LAI_{mx} = índice máximo de área foliar para a planta.

3.4.2.7 Evapotranspiração Potencial

O processo de evapotranspiração engloba todos os processos responsáveis pela transformação da água presente na superfície terrestre em vapor. Nesse contexto, são incluídos elementos como a evaporação do dossel da vegetação, transpiração, sublimação e evaporação a partir do solo, ou ambas definidas em função da evapotranspiração potencial.

A evapotranspiração é o primeiro processo no qual a água é retirada da bacia. Estima-se que aproximadamente 62% da precipitação incidente nos continentes é retornada por meio da evapotranspiração.

O SWAT tem três métodos para a estimativa da evapotranspiração potencial: Penman-Monteith, Priestley-Taylor e Hargreaves. Na simulação em questão o modelo utilizou o método Penman-Monteith, o qual necessita de séries de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento.

3.4.2.8 Água No Solo

O volume de água armazenada no solo pode variar de zero, quando o solo é secado em estufa, até um valor máximo de sua capacidade, onde o solo é considerado saturado. Para interações entre a vegetação e o solo, dois estágios intermediários são conhecidos: a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente.

A capacidade de campo consiste na quantidade de água encontrada em um solo quando, em sua condição de saturação, tenha sido drenado por aproximadamente dois dias. Já o ponto de murcha permanente refere-se à quantidade de água encontrada no solo, onde as plantas murcham e não conseguem se recuperar, devido à dificuldade de extrair a água, mesmo que em um ambiente úmido.

Cabe dizer a capacidade de campo e o ponto de murcha estão relacionados com a tensão a qual é submetida ao solo. Esse estágio é a quantidade de água retida no solo na tensão de 0,033 MPa. Por sua vez, o ponto de murcha é a quantidade de água retida no solo com uma tensão de 1,5 MPa.

A quantidade de água existente entre a capacidade de campo e o ponto de murcha é considerada como a água disponível para extração das plantas, conhecida, também como capacidade de água disponível e expressa segundo a Equação 26:

$$AWC=FC-WP \quad (26)$$

Onde:

AWC = quantidade de água disponível para as plantas;

FC = quantidade de água em um solo na capacidade de campo;

WP = quantidade de água presente no ponto de murcha permanente.

3.4.2.8.1 Percolação

A percolação no solo é calculada para cada camada do perfil geológico. A água que percola entre o solo representa aquela excedente da capacidade de campo de cada camada. O volume de água disponível à percolação na camada de solo é calculado pelas seguintes equações:

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad \text{se } SW_{ly} > FC_{ly} \quad (27)$$

$$SW_{ly,excess} = 0 \quad \text{se } SW_{ly} \leq FC_{ly} \quad (28)$$

Onde:

$SW_{ly,excess}$ = volume de água drenada na camada de solo em um dia qualquer, em mm;

SW_{ly} = conteúdo de água da camada de solo em um dia qualquer, em mm;

FC_{ly} = quantidade de água em uma camada de solo na capacidade de campo.

A quantidade de água que percola da camada superior para a inferior é obtida através da Equação 29:

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (29)$$

Onde:

$w_{perc,ly}$ = quantidade de água percolada em um dia, em mm;

Δt = intervalo de tempo, em horas;

TT_{perc} = tempo de propagação para a percolação, em horas.

O tempo de propagação é específico para cada camada de solo e é calculado pela Equação 30:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (30)$$

Onde:

TT_{perc} = tempo para a percolação, em horas;

SAT_{ly} = quantidade de água na camada de solo em condições de saturação, em mm;

FC_{ly} = água presente na camada de solo em condição de capacidade de campo, em mm;

K_{sat} = condutividade hidráulica para a camada, em mm/h.

3.4.2.8.2 Água Subterrânea

Dois aquíferos para cada bacia são considerados no processo de modelagem do SWAT: o aquífero raso refere-se aquele não confinado e que contribui para a vazão no canal principal ou dentro da bacia; já o aquífero profundo é aquele confinado, modelado assumindo que a água de entrada irá contribuir para a vazão fora da bacia (ARNOLD; ENGEL; SRINIVASAN, 1993, *apud* NEITSCH et al., 2011).

O balanço hídrico do aquífero raso é definido por:

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + W_{rchrg} - Q_{gw} - W_{revap} - W_{deep} - W_{pump,sh} \quad (31)$$

Onde:

- $aq_{sh,i}$ = quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i, em mm;
- $aq_{sh,i-1}$ = quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i-1, em mm;
- W_{rchrg} = recarga no aquífero no dia i, em mm;
- Q_{gw} = escoamento subterrâneo ou de base, no canal principal no dia i, em mm;
- W_{revap} = escoamento que retorna ao perfil do solo, em mm;
- W_{deep} = percolação da água do aquífero raso para o profundo, em mm;
- $W_{pump,sh}$ = água retirada do aquífero raso, em mm.

3.4.2.8.3 Recarga do Aquífero

Antes de chegar no aquífero raso a água que percola no solo passa pela denominada zona vadosa, ou seja, a porção superficial do solo em que os poros encontram cheios de ar. O período que a água leva para percolar o solo até encontrar o aquífero raso depende da profundidade do nível do lençol freático e das propriedades hidráulicas da formação geológica.

A recarga do aquífero através da percolação não é instantânea, sendo que pode levar um ou mais dias até que seja estabilizada. Essa recarga, em qualquer dia, pode ser calculada pela equação proposta por Venetis (1969) e utilizada por Sangrey, Harrop-Williams e Klaiber (1984), conforme a seguir:

$$W_{rchrg,i} = \left(1 - e^{\left[\frac{-1}{\delta_{gw}} \right]} \right) \cdot W_{seep} + e^{\left[-1 \delta_{gw} \right]} \cdot W_{rchrg,i-1} \quad (32)$$

Onde:

- $W_{rchrg,i}$ = recarga do aquífero no dia i, em mm;
- δ_{gw} = tempo de resposta do aquífero, em dias;
- W_{seep} = quantidade de água que drena do solo, em mm;
- $W_{rchrg,i-1}$ = recarga do aquífero no dia i-1.

A água que drena do solo no dia i é calculada pela Equação 33:

$$W_{seep} = W_{perc,ly=n} + W_{crk,btm} \quad (33)$$

Onde:

$w_{\text{perc.ly=n}}$ = água que percola da camada mais baixa, n, do perfil de solo, em mm;

$w_{\text{crk,btm}}$ = quantidade de água após a camada mais baixa do perfil de solo devido ao desvio de fluxo, em mm.

3.4.2.8.4 *Escoamento de Base*

O aquífero raso é influenciador na contribuição no escoamento de base. Esse escoamento somente ocorre quando a água armazenada no aquífero exceder o limite proposto pelo usuário do modelo SWAT. Pode ser obtido através da Equação 34:

$$Q_{\text{gw}} = \frac{80000 \cdot K_{\text{sat}}}{L_{\text{gw}}^2} \cdot h_{\text{wtbl}} \quad (34)$$

Onde:

Q_{gw} = escoamento de retorno, em mm;

K_{sat} = condutividade hidráulica do aquífero, em mm/dia;

L_{gw} = comprimento do dreno, em m;

h_{wtbl} = cota piezométrica, em m.

3.4.2.8.5 *Capilaridade*

Através da força capilar a água pode se mover do aquífero raso para a zona não saturada acima. No SWAT há a modelagem do retorno da água do aquífero raso para as camadas não saturadas do solo como uma função da demanda de água para a evapotranspiração, ou seja, é a água que, ao retornar do aquífero para o perfil de solo, é transferida para a atmosfera através da evaporação do solo e raízes das plantas.

Com o objetivo de distinguir categoricamente os termos de evaporação do solo e transpiração, o processo é chamado no SWAT como “Revap”. Bem como o escoamento de retorno, o “Revap” somente ocorre quando a quantidade de água existente no aquífero raso excede um limite especificado pelo usuário do modelo. A quantidade máxima de água que pode ser removida do aquífero através de “Revap” em qualquer dia é obtida através da Equação 35:

$$w_{\text{revap,nx}} = \beta_{\text{rev}} \cdot E_0 \quad (35)$$

Onde:

$w_{\text{revap, mx}}$ = quantidade máxima de água que é retirada do aquífero, em mm;

β_{rev} = coeficiente de R_{evap} ;

E_0 = evapotranspiração potencial, em mm.

3.4.2.8.6 Percolação para o Aquífero Profundo

Uma parte da recarga diária pode percolar até o aquífero profundo. Essa percolação somente irá ocorrer caso a água armazenada no aquífero raso exceder o valor limite definido pelo usuário do SWAT. A quantidade máxima de água que pode percolar do aquífero raso para o aquífero profundo em um dia aleatório é dada pela Equação 36:

$$w_{\text{deep, max}} = \beta_{\text{deep}} \cdot w_{\text{rchrg}} \quad (36)$$

Onde:

$w_{\text{deep, mx}}$ = quantidade máxima de água que irá percolar até o aquífero profundo, em mm;

β_{deep} = coeficiente de percolação do aquífero;

w_{rchrg} = água que irá entrar no aquífero, em mm.

O balanço hídrico do aquífero profundo é dado pela Equação 37:

$$aq_{\text{dp, i}} = aq_{\text{dp, i-1}} + w_{\text{deep}} - w_{\text{pump, dp}} \quad (37)$$

Onde:

$aq_{\text{dp, i}}$ = água armazenada no aquífero profundo no dia i, em mm;

$aq_{\text{dp, i-1}}$ = água armazenada no aquífero profundo no dia i-1, em mm;

w_{deep} = quantidade de água que percolou do aquífero raso para o profundo, em mm;

$w_{\text{pump, dp}}$ = água retirada do aquífero profundo.

É importante salientar que a água que entra no aquífero profundo não é contabilizada em outros processos do modelo SWAT, sendo então considerada como perdida na bacia hidrográfica em análise, ou seja, não se transforma em água nos rios em estudo.

3.4.2.9 Propagação no reservatório

Quando na bacia modelada há reservatórios, a propagação nestes envolve a dinâmica da água pela rede de canais da bacia, onde além de perdas podem ocorrer processos de armazenamento e propagação. A propagação no reservatório é dada pela Equação 38:

$$VM = VM_0 + QI - QO - EV - SEP \quad (38)$$

Onde:

VM = volume de água armazenada no fim do dia, em m³;

VM₀ = volume de água armazenada no início do dia, em m³;

QI = escoamento de entrada, em m³;

QO = escoamento de saída, em m³;

EV = evaporação, em m³;

SEP = infiltração, em m³.

3.4.2.10 Propagação no canal

O SWAT utiliza de informações sobre o comprimento, declividade, profundidade e coeficiente de Manning na margem do rio para a simulação do efeito de propagação no canal. A taxa de escoamento e a velocidade média do fluxo são calculadas usando a equação de Manning. Assim, para o segmento de canal com ponto de entrada e saída próximos, o armazenamento baseia-se na equação da continuidade, conforme:

$$V_{in} - V_{out} = \Delta V_{stored} \quad (39)$$

Onde:

V_{in} = volume de entrada, em m³;

V_{out} = volume de saída, em m³;

V_{stored} = variação do volume de água armazenada, em m³.

A taxa de variação do volume de água de entrada durante um intervalo de tempo é dada pela Equação 40:

$$q_{in,ave} + \frac{V_{stored,1}}{\Delta t} - \frac{q_{out,1}}{2} = \frac{V_{stored,2}}{\Delta t} + \frac{q_{out,2}}{2} \quad (40)$$

Onde:

$V_{stored,1}$ = volume armazenado no início do processo, em m³;

$V_{stored,2}$ = volume armazenado no fim do processo, em m³;

$q_{out,1}$ = vazão de saída no início do processo, em m³/s;

$q_{out,2}$ = vazão de saída no final do processo, em m³/s;

Δt = intervalo de tempo entre o início do processo e o final do processo.

O tempo de propagação no canal é uma relação entre o volume de água do canal e o escoamento, dada pela Equação 41:

$$TT = \frac{V_{stored}}{q_{out}} = \frac{V_{stored,1}}{q_{out,1}} = \frac{V_{stored,2}}{q_{out,2}} \quad (41)$$

Onde:

TT = tempo de propagação, em s;

V_{stored} = volume armazenado, em m³;

q_{out} = taxa de escoamento, em m³/s.

A relação entre o tempo de propagação e o coeficiente de armazenamento é dada por:

$$q_{out,2} = \left(\frac{2\Delta t}{2TT + \Delta t} \right) q_{in,ave} + \left(1 - \frac{2\Delta t}{2TT + \Delta t} \right) q_{out,1} \quad (42)$$

A Equação 43 é semelhante à equação do método do coeficiente:

$$q_{out,2} = SC q_{in,ave} + (1-SC) q_{out,1} \quad (43)$$

Onde:

SC = coeficiente de armazenamento.

O coeficiente de armazenamento (SC) é estimado usando a Equação 44:

$$SC = \frac{2\Delta t}{2TT + \Delta t} \quad (44)$$

E, o escoamento de saída do trecho considerado é determinado pela Equação 45:

$$q_{out,2} = q_{in,love} + \frac{V_{stored,1}}{\Delta t} \quad (45)$$

Findada a simulação no SWAT é necessária uma análise precisa dos valores dos parâmetros que são sensíveis no processo de produção de água, ou seja, uma análise de sensibilidade.

3.4.3 Análise de Sensibilidade

A análise sensibilidade consiste em um processo que avalia a variabilidade dos dados de saída em relação as mudanças nos parâmetros de entrada do modelo (ARNOLD et al., 2012). Sobremaneira é necessário identificar os parâmetros de entrada mais sensíveis para que o trabalho seja empenhado neles a fim de se refinar os valores de vazões simulados.

Para Sellami et al. (2014) uma forma de trabalhar com modelos hidrológicos de alto desempenho, como o SWAT, é conduzir a análise de sensibilidade para selecionar apenas os parâmetros mais sensíveis que, por sua vez, se supõe representar o real comportamento do sistema.

Quando tida como global, a análise de sensibilidade analisa aleatoriamente ou sistematicamente todo o intervalo de valores de um parâmetro e as combinações possíveis de existir entre os diferentes parâmetros (VAN GRIENSVEN et al., 2006). Segundo Arnold et al. (2012), diferentemente da análise local que altera o valor de cada parâmetro, a análise global permite que todos sejam alterados, porém isso cria uma desvantagem que é a necessidade de grandes números de simulações.

Uma ferramenta utilizada na análise de sensibilidade dos modelos de vazões no SWAT é o *Sequential Uncertainty Fitting Version 2* (SUF12) embutido no software gratuito SWAT-*Calibration and Uncertainty Programs* (SWAT-CUP). Por ser automática, a análise através dessa ferramenta facilita a identificação dos parâmetros a serem calibrados bem como minimiza tempo e chances de erros no processo, sendo largamente recomendada pelos desenvolvedores do SWAT.

Segundo Abbaspour et al. (2007) a sensibilidade dos parâmetros analisados é computada através do cálculo do sistema de regressão múltipla (vide equação 46), que regressa os valores dos parâmetros gerados pela amostragem por hipercubo latino (*Latin Hypercube*) versus os valores da função objetivo.

$$g = \alpha - \sum_{i=1}^m \beta_i b_i \quad (46)$$

Onde:

g = variável dependente;

α = coeficiente técnico fixo;

β_i = coeficiente técnico atrelado à variável b_i ;

b_i = variável independente (parâmetros);

m = número de parâmetros.

A sensibilidade dos parâmetros é avaliada pelos valores de *t-stat* e *p-value*, onde quanto maior o valor absoluto de *t-stat* e menor o valor de *p-value*, mais sensível o parâmetro é classificado (ABBASPOUR et al., 2007).

A razão do coeficiente de regressão de um parâmetro por seu erro padrão é nomeado como *t-stat*, onde se o valor do coeficiente é maior que o seu erro padrão, então o valor de *t-stat* é maior que zero, ou seja, o parâmetro é sensível. Já para o cálculo de *p-value* é necessário comparar o valor de *t-stat* com os valores da tabela de distribuição de *t* de *Student*. O *p-value* de cada parâmetro testa a hipótese nula de que o coeficiente de regressão é igual a zero, sendo que um valor pequeno de *p-value* (menor que 0,05) indica que é possível rejeitar a hipótese nula, ou seja, o parâmetro exerce influência na variável dependente, sendo, portanto, sensível. O valor de 0,05 refere-se à existência de uma probabilidade de 95% da variável dependente estar sofrendo algum efeito com a mudança do valor do parâmetro (ABBASPOUR et al., 2007).

Esse processo de análise de sensibilidade precede a calibração do modelo, uma vez que limita os parâmetros mais influentes no processo.

3.4.4 Calibração

De acordo com Moriasi et al. (2007), o processo de calibração poder ser definido como uma estimativa sucessiva de valores de parâmetros feita através da comparação entre os valores simulados por um determinado modelo e os dados observados para uma mesma situação. Tal processo pode ser feito de forma automática através do uso de uma função objetivo, onde utiliza-se de uma equação para determinar o desvio entre os dados de saída do modelo e os valores observados (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999).

Dentre as principais funções objetivos citadas por Moriasi et al. (2007) utilizadas em modelos hidrológicos, tem-se o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) que verifica o ajuste dos picos de vazão. O COE varia de 1 a $-\infty$ e quando nulo indica que os valores simulados são

iguais as médias dos valores medidos, já o COE negativo demonstra uma simulação incorreta (NASH e SUTCLIFFE, 1970). A seguir pode-se verificar a Equação 47 deste coeficiente:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E})^2} \quad (47)$$

Onde:

E_m = evento monitorado;

n = número de eventos;

\bar{E} = média dos eventos monitorados.

Moriasi et al. (2007) também apresenta os valores de COE classificados de acordo com a qualidade do processo de calibração de modelos hidrológicos, os quais podem ser do tipo muito bom, bom, satisfatório e insatisfatório. Na tabela a seguir pode-se observar essa classificação.

Tabela 1 - Valores dos coeficientes com relação ao desempenho da calibração para modelagem de produção de água.

Classificação	COE
Muito boa	0,75 a 1,00
Boa	0,65 a 0,75
Satisfatória	0,50 a 0,65
Insatisfatória	<0,50

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2007)

No que diz respeito ao processo de calibração através do uso do algoritmo SUFI2, o mesmo consiste no desenvolvimento de duas etapas principais, primeiro tem-se a definição da função objetivo e em seguida a definição das faixas mínimas e máximas para os parâmetros que serão otimizados. As faixas de incerteza iniciais são atribuídas com valores próximos aos valores dos parâmetros da primeira rodada da amostragem pelo hipercubo latino, dessa forma, essa amostragem é realizada levando a n combinações de valores dos parâmetros. Na sequência avalia-se as iterações por meio da função objetivo, onde uma série de medidas é calculada com o objetivo de avaliar cada rodada de amostragem. Por fim, avalia-se as incertezas considerando o cálculo com previsão de 95% de incertezas para todas as variáveis na função objetivo. Vale frisar que na primeira iteração as incertezas dos parâmetros são altas, o que faz com que novas

interações sejam necessárias atribuindo assim novos intervalos para cada parâmetro (ABBASPOUR et al., 2007; BENAMAN, et al., 2005).

Essa exposição teórica abordada até este ponto já foi motivo de estudos em diversas regiões e por muitos pesquisadores, pelo que o próximo item expõe aqueles que mais se aproximam dos objetivos deste trabalho.

3.4.5 Trabalhos desenvolvidos no SWAT

O uso do modelo SWAT vem sendo largamente empregado entre pesquisadores da área de hidrologia. Segundo Gassman, et al. (2007), esse modelo já serviu como importante ferramenta de avaliação de mudanças climáticas, efeitos do uso do solo sobre recursos hídricos e avaliações da capacidade do modelo em aplicações futuras, principalmente na Europa e nos Estados Unidos.

No Brasil existem diversos exemplos o uso do modelo SWAT em estudos de análise de balanço hídrico e produção de sedimentos.

Badissera (2005) aplicou o modelo para simular as vazões mensais na Bacia do Rio Cuiabá citando que o mesmo demonstrou aplicabilidade satisfatória para a região de estudo e levantando suas limitações em boas repostas quando deficientes as entradas de pedologia e distribuição espacial dos solos.

Souza (2011) analisou a estimativa das vazões mínimas na bacia do Altíssimo Rio Negro na região sul do Brasil, aplicando o modelo SWAT e obtendo respostas de que tal, no que diz respeito a simulação de vazões mínimas, considera os elementos que afetam diretamente o regime hidrológico dessas vazões. Além disso, o autor verificou que o SWAT reproduz adequadamente as vazões da bacia de forma geral, porém, é limitado em reproduzir a variabilidade espacial dessas nas sub-bacias.

Tesch (2015) aplicou o modelo para avaliação de sua calibração considerando uma simulação em estradas não pavimentadas em bacias hidrográficas no estado do Espírito Santo, concluindo que o desempenho do modelo estava condicionado a calibração para vazões com maior frequência ao longo do período monitorado.

Souza (2016) realizou um estudo preliminar de calibração do modelo para a simulação do escoamento superficial em toda a Bacia Amazônica, aproveitando e revisando os trabalhos desenvolvidos no Brasil até aquele momento com a utilização do SWAT.

E, mais recentemente, Moreira (2017) analisou a sensibilidade de parâmetros e de desempenho do modelo SWAT na estimativa de vazões médias em bacias hidrográficas, mais

especificamente na Bacia do Rio Jucu no Espírito Santo. Essa autora verificou, após diversas tentativas de calibração, a sensibilidade do modelo quanto a amplitude proposta de análise, além de ter constatado a elevada superestimação dos dados simulados, que pode estar associado à qualidade dos dados de entrada de uso do solo, clima, pedologia espacialização das estações de monitoramento climático na área da bacia em estudo.

Assim, após a modelagem da bacia cabe, neste estudo, buscar vazões que importem em alguma finalidade, dentre elas exemplifica-se as vazões que balizam as outorgas de uso da água disponível na natureza. Dentre as mais diversas utilizadas foi objeto análise a vazão na qual em 90% do tempo é superada, obtida através da curva de permanência e intitulada Q_{90} e que será abordada nos capítulos que se seguem.

3.5 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÃO

Com o crescimento da demanda do uso de recursos hídricos pelo ser humano, conhecer a dinâmica hidrológica é um fator preponderante para se garantir a sustentabilidade do sistema que envolve os recursos naturais disponíveis.

O monitoramento contínuo e preciso seria uma forma ideal para caracterizar e estudar o comportamento de bacias hidrográficas, porém a escassez dos dados e sua imprecisão devido a altos custos de implantação, por exemplo, leva a busca por novas formas de obtenção de resultados hidrológicos nessas bacias (TUCCI, 2002; PERALTA, 2003).

Dentre essas formas encontra-se a regionalização de vazão, que segundo Fill (1987), pode ser conceituada como todo e qualquer processo de transferência de informações entre estações de monitoramento com ou sem observações da série histórica próprias. Tais transferências podem ser realizadas para séries históricas de vazões, precipitações ou demais características relevantes, tais como média; variância; máximos e mínimos; equações e parâmetros.

De forma mais objetiva Tucci (2002) afirma que regionalização de vazão se refere ao termo utilizado para denominar a transferência de informações de um local para outro com comportamento hidrológico semelhante.

Estudos de regionalização no mundo geralmente são desenvolvidos utilizando, quando são representativas, as vazões existentes; outrossim, quando esses dados são deficientes do ponto de vista de quantidade e/ou confiabilidade, há um comprometimento do uso de métodos de regionalização (OBREGON; TUCCI; GOLDENFUM, 1999; SIMMERS, 1984; MOSLEY, 1981). Gitau e Chabey (2010) avaliaram os métodos de regionalização dos parâmetros do SWAT em três bacias hidrográficas no estado do Arkansas, nos Estados Unidos para estimativa de vazões. Seus resultados foram satisfatórios apresentando coeficientes de Nash-Sutcliffe entre

0,45 e 0,90 o que indica que o modelo mostrava-se eficiente na estimativa de vazões em bacias hidrográficas sem dados medidos.

Segundo Diniz e Clarke (2001) o uso da regionalização de dados hidrológicos tem uma longa história, chegando a ser datada há mais de 40 anos. A princípio foram utilizadas fórmulas empíricas, as quais se refinaram com base na evolução dos estudos de ciclo hidrológico, avanços computacionais, além da maior disponibilidade de uma base de dados históricos.

Para Silva Júnior et al. (2003), embora a regionalização seja uma ferramenta útil no campo de conhecimento hidrológico espacial, há de se atentar para as limitações do modelo, significativas à extrapolação de seus resultados, principalmente em bacias de menor porte.

De acordo com Diniz (2008), a ciência de regionalização é de uso complexo e nunca será totalmente concluída ou suficientemente confiável, mas não significando que não deva ser usada. Isso porque quando empregada de maneira correta é uma ferramenta importante nos estudos hidrológicos de grande escala.

Segundo Obregon et al. (1999), encontra-se na literatura uma vasta seleção de estudos quanto à regionalização de vazões em todo o mundo, porém, para o autor, estes estudos são somente baseavam-se na série histórica observada de vazões, que muitas das vezes eram menores do que as de precipitação. Ilustrando esse cenário ocorre que se uma região dispõe de séries curtas ou de pequena representatividade espacial das vazões, os resultados apresentam alta vulnerabilidade de incertezas, o que pode ocasionar a inviabilização da regionalização e a consequente estimativa de vazões.

Para Reis et. al. (2006) a regionalização hidrológica pode ser aplicada para variáveis ou funções. A regionalização das variáveis ocorre quando uma variável de interesse (vazão mínima, vazão máxima, etc.) pode ser estimada numa determinada região a partir de dados pontuais existentes. Já a regionalização de uma função hidrológica é entendida quando uma função (curva de permanência de vazões, curva de regularização de vazões, etc.) pode ser avaliada a partir de informações hidrológicas pontualmente disponíveis.

3.5.1 Variáveis relevantes para regionalização hidrológica

Uma das premissas do modelo geral de regionalização é a equidade das características entre as bacias em que se busca aplicar o método. As características físicas e climáticas, para Almeida (2010), são utilizadas a fim de explicar a regionalização hidrológica além de servirem como norteador da determinação das especificidades da região em estudo.

Diversos problemas associados à regionalização hidrológica estão relacionados com a seleção de variáveis. Algumas bacias hidrográficas podem ser semelhantes entre si em relação a certas

variáveis (como o grau de cobertura florestal ou precipitação anual, por exemplo), mas completamente distintas a outras (como a geologia, por exemplo) (NATHAN e McMAHON, 1990). Por isso repousa sobre a ciência da regionalização o cuidado de escolha de variáveis que possam traduzir, ao máximo, a similaridade entre bacias.

Franchini e Suppo (1996) afirmam que a regionalização deve ser trabalhada se baseando nas características geomorfológicas e climáticas, sem dependência da continuidade geográfica, uma vez que essas características são as que definem a resposta hidrológica da região. Essa independência geográfica é reafirmada no trabalho de Andrade e Hawkins (2000), onde ao estudarem 60 bacias entre os Estados Unidos, Austrália e Nordeste Brasileiro concluíram que a hipótese de regionalização entre essas bacias não pode ser rejeitada, bem como a similaridade entre as regiões, sem influência da continuidade geográfica. Através de análises gráficas das funções de Andrews, esses autores concluíram que bacias, ainda que próximas geograficamente apresentavam comportamentos distintos quando não se assemelhavam em características físicas e climáticas.

3.5.1.1 Características Físicas

Basicamente, as características físicas de uma bacia hidrográfica são a morfologia, a pedologia, a capacidade de armazenamento de água e a cobertura vegetal. Não há dúvidas dos impactos desses fatores frente ao comportamento das bacias, todavia a quantificação é, muitas vezes, de difícil avaliação, principalmente pela interposição dos efeitos. O efeito combinado de todos os fatores caracteriza o tamanho da bacia (RAUDKIVI, 1979 *apud* DINIZ, 2008).

As características físicas mais utilizadas na regionalização hidrológica são a área de drenagem, o comprimento do rio principal, a declividade longitudinal da bacia, a declividade entre a nascente e a foz do rio principal e a densidade de drenagem. No contexto de regionalização de vazões esses dados fornecem significativas contribuições à construção de modelos hidrológicos (ALMEIDA, 2010; AMORIM, OLIVEIRA NETTO, MEDIONDO, 2005).

3.5.1.2 Características Climáticas

Ao que importa, a variável climática mais empregada em estudos de regionalização é a precipitação, considerando que para vazões máximas as precipitações mais frequentes são a máxima, diária anual, mês mais chuvoso, trimestre mais chuvoso e semestre mais chuvoso. Para vazões médias a precipitação média de longa duração é a mais usada. Por fim, a que mais se aplica em estudos de vazões mínimas e média é a precipitação total anual (BAENA et al., 2004).

Almeida (2010) afirma que se faz necessário determinar a precipitação média sobre a área de estudo e que para isso pode-se utilizar diferentes métodos, tais como o Método dos Polígonos de Thiessen e o Método das Isoietas. Esse mesmo autor argumenta que o primeiro desses métodos considera a não-uniformidade da distribuição espacial da bacia, porém desconsidera por completo o relevo da bacia.

3.5.2 Métodos de Regionalização de Vazão

Diversos métodos de regionalização de vazões são citados na literatura e levam em conta variáveis específicas que produzem uma equação matemática para a estimativa da descarga na bacia desejada. O mais comumente utilizado, inclusive por sua fácil manipulação, é o Método Eletrobrás (1985) conhecido como Método Tradicional.

Pelo fato do objetivo deste trabalho estar ligado a análise comparativa das formas de se obter a vazão mínima de referência Q_{90} , buscou-se junto a literatura autores que já desenvolveram trabalhos desse espectro para a região da bacia do Rio Timbuí. Foram encontrados dois trabalhos que serão objetos de estudo: de Euclides et al. (2007) e Ferreira (2010).

3.5.2.1 Método Eletrobrás (1985) – baseado em equações de regressões regionais

Comumente conhecida como Método Tradicional, essa metodologia é baseada na análise de frequência das vazões adimensionalizadas de cada estação e na identificação de regiões com comportamento hidrológico semelhante a partir da obtenção de um coeficiente de determinação, resultante da aplicação de regressão múltipla entre os valores das vazões e das características físicas e climáticas das sub-bacias. Matematicamente a função que rege o método é a Equação 48, representada a seguir:

$$Q = f(A, L, D_d, S_m, SL, P) \quad (48)$$

Onde:

Q = vazão;

A = área de drenagem;

L = comprimento do rio principal;

D_d = densidade de drenagem;

S_m = declividade média da bacia hidrográfica;

SL = declividade média do rio principal; e

P = precipitação média na bacia hidrográfica.

Segundo Ferreira (2010), o ajuste das equações de regressão deve buscar atingir o maior grau de liberdade, conforme observado na Equação 49 a seguir:

$$\text{Grau de liberdade} = n - p - 1 \quad (49)$$

Onde:

n = número de observações;

p = número de variáveis independentes.

Nesse ínterim, Pinto e Naghettini (2007) afirmam que o número de observações disponíveis para análises de regressão não deve ser inferior a três vezes o número da variável.

O modelo ideal para o traçado de bacias hidrologicamente homogêneas, de forma geral, tende a ser restrito, uma vez que no meio ambiente a variabilidade de fatores como clima, topografia, cobertura vegetal, tipo de solo, etc. são extremamente variáveis. Por isso, nos processos de regionalização de bacias hidrologicamente homogêneas busca-se se aproximar o quanto mais possível de equidade e equilíbrio dos fatores ambientais.

Logo, a identificação dessas regiões pode ser feita em duas etapas: a primeira, delimitando-as baseando nas características locais; e a segunda, com base em testes estatísticos locais objetivando a verificação de resultados preliminares quanto as semelhanças inter-relacionadas (HOSKING e WALLIS, 1997).

3.5.2.1.1 Trabalhos desenvolvidos para a região em estudo

Ferreira (2010) fez o uso do método Eletrobrás (1985) baseado em equações de regressões lineares para o estado do Espírito Santo a fim de se obter a vazão mínima de referência para bacias hidrologicamente homogêneas.

Essa autora listou 23 estações fluviométricas no estado a partir de testes e observações de parâmetros estatísticos associados, tais como erro padrão fatorial, erros percentuais, erro médio e coeficiente de determinação (R^2), subdividiu as bacias em menores até que se atendessem os parâmetros recomendados por Eletrobrás (1985).

O primeiro passo foi considerar que todas as estações formariam uma única bacia e, por conseguinte, analisar os parâmetros estatísticos. Como esperado esses parâmetros se divergiram dos limites aceitáveis, onde a própria metodologia traduz como causa a falta de similaridade entre as regiões.

Logo, foram realizadas subdivisões da bacia até que se obtivesse a similaridade aceitável. Ferreira (2010) considerou, para essa primeira subdivisão, a distribuição geográfica das estações para delimitação.

Importante salientar que na primeira subdivisão percebeu-se que a estação fluviométrica Valsugana Velha-Montante se localizava isoladamente em uma posição geográfica que poderia ser indicada tanto para uma sub-bacia quanto a outra. A decisão tomada naquele estudo foi de incluí-la na sub-bacia que possuía o menor número de estações (SR-1) e verificar se a adição da mesma melhoraria as estimativas, ou seja, que fizessem com que os parâmetros estatísticos associados convergissem a um resultado satisfatório. Notou-se que caso fosse retirada a estação de Valsugana Velha-Montante para testar a possibilidade de melhoria das estimativas, não seria mais recomendável a utilização de um modelo com duas variáveis explicativas, por se tratar de sub-região com apenas cinco estações. Logo, por isso, foi mantida a estação na sub-bacia citada outrora.

Por fim, a seguir apresenta-se o modelo de melhor ajuste entre as vazões observadas e estimadas correspondentes para a sub-bacia SR-1, segundo o estudo de Ferreira (2010).

$$Q_{90} = 1,02514 \times 10^2 \times L^{1,04} \times S_m^{10,5} \quad (50)$$

Onde:

L = comprimento do rio principal, em km;

S_m = declividade média da bacia, em m/m;

Q_{90} = Vazão de referência, em m³/s.

Ressalta-se que a equação apresentada em conjunto é válida para valores de área entre 89 e 2.142 km² e comprimento do talvegue entre 18,12 e 171,88 km.

Já Euclides et al. (2007) abordaram uma análise qualitativa que só se tornou possível após um vasto levantamento de dados e com a aplicação de métodos existentes. Com isso, apontou aspectos que favorecem ou não sua aplicação em bacias de pequeno porte.

O trabalho desses autores foi mais recentemente abordado por Pogian (2016), o qual analisou de forma crítica diversos métodos consagrados pela bibliografia e, por um viés voltado à aplicação dos mesmos em pequenas bacias, selecionou para análise qualitativa os métodos de Eletrobrás (1985) e de Silveira (1997).

O banco de dados explorado foi a base de informações hidrológicas do portal *online* HidroWEB (ANA, 2015) a fim de se obtivesse séries históricas que permitissem a apropriação das vazões mínimas estatisticamente.

As buscas e armazenamento das informações foram compiladas em três grupos. Ao que importa para este trabalho cita-se o Grupo A, que refere-se a estações fluviométricas localizadas no Espírito Santo com área de drenagem de até 200 km². A estação fluviométrica de Valsugana Velha-Montante ficou locada no subgrupo A-3.

A delimitação da área de drenagem foi realizada por Pogian (2016) através do software Google Earth Pro, além do apoio de arquivos compatíveis com SIG.

A caracterização do uso e ocupação do solo fora realizada com base no levantamento Aerofotogramétrico do Espírito Santo realizado pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) entre os anos de 2007 e 2008.

Resultado dessa etapa o autor afirma que a bacia pertencente ao subgrupo A-3 caracteriza-se por quantidade majoritária de florestas (mata nativa), num total de 58%. Na sequência, as áreas de Eucalipto e Café apresentaram área de 14% e 6%, respectivamente.

Para obtenção das vazões mínimas utilizou-se o aplicativo *online* I 3Geo – Interface Integrada de Ferramentas de Geoprocessamento para Internet, desenvolvido pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) de acesso gratuito. Uma vez que utilizado pelo órgão gestor de recursos hídricos do estado o autor justifica que a aplicação dele em sua pesquisa está calçada.

Em sequência, Pogian (2016) utilizou para o ponto A-3, localizado na bacia do Rio Reis Magos, a equação a seguir para obtenção da vazão Q₉₀, tendo esta proposta por Euclides et al. (2007). Importante salientar que a região de influência desse abrange a estação de Valsugana Velha-Montante e mais sete estações com área de drenagem entre 82 km² e 1.690 km², com R² = 0,97.

$$Q_{90} = 4,47 \times 10^{-11} \times A^{0,0484} \times P_m^{2,5638} \quad (51)$$

Onde:

A = Área de drenagem em km²;

P_m = Precipitação média anual na bacia em mm;

Q₉₀ = Vazão de referência em m³/s.

Pelo fato da estação fluviométrica de Valsugana Velha-Montante estar localizada em um ponto a montante de boa parte da bacia do Rio Timbuí essas equações apresentadas têm uma limitação de serem válidas apenas para essa região. Isso implica que ao passo que se avança para o litoral

(região a jusante) a bacia apresenta declividade menores que aquela estabelecida como mínima, segundo a equação de Ferreira (2010).

Todavia, o uso das equações de regionalização é uma das ferramentas de se estimar vazões mínimas de referência e como parte da região em estudo é carente de dados de monitoramento de vazões

Em finalização a este capítulo de revisão bibliográfica, há de se pontuar que não se viu na literatura algo que pudesse se assemelhar ao trabalho aqui proposto, onde se busca conhecimento dos resultados do uso do SWAT na bacia do Rio Timbuí e uma análise comparativa entre outros métodos, como os de regionalização. Isso culminou no motivo pelo qual se discute o assunto mediante a metodologia que se segue.

4. METODOLOGIA

4.1 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

A região pretendida para estudo e, por consequência, a estimativa de vazões mínimas de referência (Q_{90}), está situada na porção central do estado do Espírito Santo, mais especificamente a bacia hidrográfica do Rio Timbuí. Por questões didáticas fez-se uma discussão das tarefas em três etapas elencadas a seguir.

A primeira etapa da metodologia consiste na modelagem hidrológica da bacia com uso do SWAT. Através de uma sequência de passos, desde a coleta de dados de entrada até a efetiva modelagem do balanço hídrico, a bacia será estudada com o objetivo de se obter vazões diárias para um período pré-definido.

Na segunda etapa essas vazões estimadas servirão de subsídio para a determinação das vazões mínimas de referência (Q_{90}) com uso da curva de permanência específica.

Por conseguinte, na terceira etapa, serão aplicadas as equações de regionalização de vazões mínimas de referência propostas por Euclides et al. (2007) e Ferreira (2010) em seus estudos para a bacia do Rio Timbuí.

Por fim, fruto desses trabalhos, será possível a análise crítica da correlação entre as vazões estimadas pelo SWAT e as vazões obtidas através de equações pré-definidas de regionalização de vazões mínimas. *Pari passu*, serão abordados estudos comparativos dessas vazões com àquelas medidas no posto fluviométrico de Valsugana Velha-Montante.

Nessa análise comparativa utilizar-se-á o índice do Erro Relativo (ER) para se analisar a escalabilidade da divergência entre os valores monitorados através da série histórica e os modelados através do SWAT. Obviamente que essa ação somente poderá ser realizada para a sub-bacia detentora da estação fluviométrica de Valsugana Velha-Montante.

O método do Erro Relativo vem sendo largamente utilizado por autores nas análises comparativas de resultados de modelos hidrológicos face ao monitoramento, como Ribeiro, Marques e Silva (2005); Amorim, Oliveira Netto e Mendiondo (2005); Silva, Marques e Lemos (2009); Moreira (2010); Pogian (2016).

Sua obtenção se dá pela diferença relativa entre os dois valores (observado e modelado) conforme a Equação 52:

$$ER=100 \times \left(\frac{Q_{obs}-Q_{est}}{Q_{obs}} \right) \quad (52)$$

Onde:

ER = erro relativo, em %;

Q_{obs} = vazão observada no ponto de interesse, calculada através da série histórica, em m³/s;

Q_{est} = vazão estimada através de modelagem, em m³/s.

Quando em valores negativos o erro relativo representa uma superestimava das vazões, ou seja, o valor obtido através da simulação ou aplicação de equações é superior aquele observado. Por outro lado, quando positivo, representam vazões subestimadas pelos modelos ou equações.

4.2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho se concentra na bacia hidrográfica do Rio Timbuí. Sua escolha se deu pelo fato de estar situada numa região com pouco dados de monitoramento da vazão de seu curso d'água principal, mas, por outro lado, com grande potencial de abastecimento de água para os municípios de Santa Teresa, Fundão e Serra, quer seja para consumo humano, quer seja para agricultura, indústrias, etc.

4.2.1 Bacia do Rio Timbuí

A bacia do Rio Timbuí está localizada no município de Santa Teresa, no estado do Espírito Santo e possui aproximadamente 666,4 km². Segundo informações disponíveis no portal virtual Geobases, ela é uma otobacia de nível 5, nomeada como bacia do Rio Timbuí (ou Reis Magos ou Rio Fundão) e que se estende até o deságue no Oceano Atlântico na localidade de Nova Almeida, município da Serra. Essa bacia abrange parte dos municípios de Santa Teresa, Ibirapu, Santa Leopoldina, Serra e Fundão.

Está situada entre duas zonas naturais, segundo a classificação do Incaper (2011): terras de temperaturas amenas, acidentadas e chuvosas e terras de temperaturas amenas, acidentadas e chuvosas/secas.

Apresenta predominância de Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (LVd3, LVd4 e LVd5) e sua topografia classifica-se entre ondulada, de 8 a 45% de declividade, e montanhosa, entre 45 e 75% de declividade. O clima é classificado como Úmido Frio com temperatura média anual de 19,9 °C e uma evapotranspiração potencial anual de 1.094 mm (INCAPER, 2011).

A seguir tem-se o mapa ilustrando essa bacia.

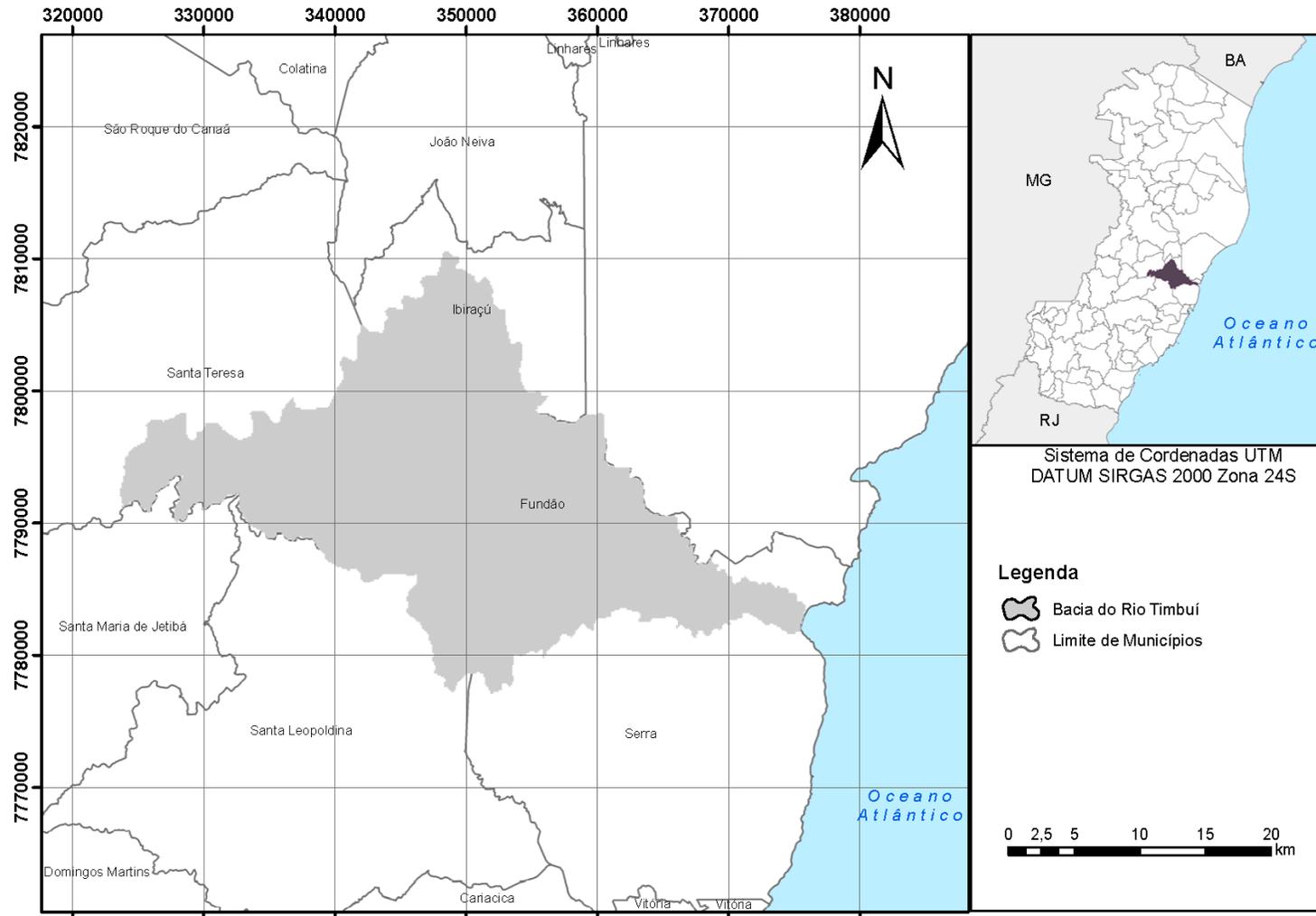


Figura 2 - Mapa de localização da bacia

Fonte: Autoria própria

4.3 PRIMEIRA ETAPA: MODELAGEM HIDROLÓGICA COM USO O SWAT

Definida a área de estudo prosseguiu-se na coleta de dados existentes que subsidiaram a modelagem com o SWAT, pautada nas referências de manuais de uso do mesmo e aplicações de pesquisadores do modelo.

4.3.1 Coleta de dados existentes

Segundo Moreira (2017), o modelo SWAT necessita de dados de entrada referentes as características físicas e climáticas da bacia em estudo. Para isso utiliza-se como ferramenta o ArcSWAT, extensão que auxilia na manipulação dos dados no ambiente ArcGIS, no caso, o ArcMap versão 10.3.

Esses dados podem ser divididos em três grupos: variáveis climáticas, fisiográficas e fluviométricas.

4.3.1.1 Variáveis Climáticas

As variáveis climáticas foram obtidas junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) através da consulta da série histórica das estações meteorológicas de monitoramento mais próximas a bacia, ou, preferencialmente, contida na mesma. Dentre essas estações escolheu-se as que apresentavam maior amplitude de informações, sendo elas a de Santa Teresa e Vitória. Os dados existentes e utilizados nessa pesquisa contêm uma amplitude da série histórica de 9 anos (de 2006 a 2015) e são as seguintes:

- Temperaturas máximas e mínimas do ar (°C);
- Umidade relativa do ar (%);
- Radiação solar (Kj/m²);
- Velocidade do vento (m/s);
- Precipitação (mm/h).

Ainda que a Agência Nacional de Águas (ANA) tenha disponível os dados de precipitação das estações pluviométricas da região, optou-se neste estudo o uso do registro histórico das estações selecionadas e monitoradas pelo INMET. Isso porque as amplitudes dos registros na ANA não eram coincidentes com os das demais variáveis, o que não é aceito na modelagem do SWAT. Esses dados brutos foram tratados, uma vez que o SWAT necessita que cada variável seja definida por valores estatisticamente representativos nas séries históricas.

O SWAT requer que seja feito um procedimento de preenchimento de falhas através da obtenção de valores estatisticamente representativos das séries temporais das estações meteorológicas. A definição dos parâmetros utilizados no gerador de clima (*Weather Data Definition* no SWAT), bem como os valores obtidos para as estações de Santa Teresa (STT) e Vitória (VIX) apresentam-se a seguir.

A variável TMPMX representa a média das temperaturas máximas diárias a cada mês (°C) e TMPSTDMX o desvio padrão das temperaturas máximas diárias a cada mês (°C), conforme Tabela 2:

Tabela 2 - Média e Desvio padrão das temperaturas máximas diárias a cada mês (°C)

Mês	Santa Teresa (STT)		Vitória (VIX)	
	TMPMX	TMPSTDMX	TMPMX	TMPSTDMX
Jan	25,983	2,601	31,950	2,225
Fev	26,359	2,829	32,372	1,843
Mar	25,459	2,673	31,797	2,114
Abr	23,270	3,782	30,286	2,199
Mai	20,957	4,371	28,207	2,301
Jun	20,364	2,929	27,347	2,435
Jul	19,679	3,154	27,024	2,397
Ago	20,700	3,305	27,475	2,511
Set	22,003	3,512	28,257	2,861
Out	21,186	7,154	28,801	3,267
Nov	22,122	6,172	29,391	3,047
Dez	25,931	3,312	31,070	2,767

Fonte: Autoria própria

Da mesma forma, a variável TMPMN representa a média das temperaturas mínimas diárias a cada mês (°C) e TMPSTDMN o desvio padrão das temperaturas mínimas diárias a cada mês (°C), conforme Tabelas 3 e 4:

Tabela 3 - Média e Desvio padrão das temperaturas mínimas diárias a cada mês (°C)

(continua)

Mês	Santa Teresa (STT)		Vitória (VIX)	
	TMPMN	TMPSTDMN	TMPMN	TMPSTDMN
Jan	17,169	1,026	23,451	1,299
Fev	17,353	1,425	23,179	1,176
Mar	17,468	1,152	23,121	1,264
Abr	16,282	2,532	21,998	1,500
Mai	14,240	2,828	19,514	1,539
Jun	13,946	1,823	18,512	1,759

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 - Média e Desvio padrão das temperaturas mínimas diárias a cada mês (°C)
(conclusão)

Mês	Santa Teresa (STT)		Vitória (VIX)	
	TMPMN	TMPSTDMN	TMPMN	TMPSTDMN
Jul	13,225	1,835	18,221	1,651
Ago	13,167	1,739	18,369	1,828
Set	13,796	2,036	19,832	2,139
Out	13,947	4,473	21,165	2,087
Nov	15,031	3,994	22,074	1,871
Dez	17,374	1,709	23,227	1,422

Fonte: Autoria própria

Quanto a precipitação, a variável PCPMM traduz a média da precipitação mensal total para o período (mm) e PCPSTD o desvio padrão das precipitações a cada mês (mm/dia), conforme Tabela 5:

Tabela 5 - Média e Desvio padrão da precipitação mensal total para o período (mm)

Mês	Santa Teresa (STT)		Vitória (VIX)	
	PCPMM	PCPSTD	PCPMM	PCPSTD
Jan	178,320	13,891	155,436	15,133
Fev	100,660	8,614	66,255	5,860
Mar	169,980	11,136	160,855	18,506
Abr	107,460	7,899	121,982	12,260
Mai	59,660	4,682	96,509	13,031
Jun	78,180	7,943	67,782	7,230
Jul	80,160	6,692	70,309	5,664
Ago	137,533	11,120	75,700	6,664
Set	71,560	5,871	33,800	3,279
Out	147,560	12,505	150,700	17,343
Nov	236,180	13,429	239,382	19,452
Dez	218,080	19,783	162,545	16,939

Fonte: Autoria própria

E, PCPSKW representa o coeficiente assimétrico para a precipitação diária a cada mês, podendo ser obtido pela Equação 53 e seus resultados conforme Tabela 6:

$$PCPSKW = \frac{N \sum_{d=1}^N (R_{\text{dia, mês}} - PCPMM)^3}{(N-1)(N-2)(PCPSTD)^3} \quad (53)$$

Tabela 6 - Coeficiente Skew para a precipitação diária a cada mês

Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)	Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)
	PCPSKW	PCPSKW		PCPSKW	PCPSKW
Jan	2,65	4,13	Jul	1,95	3,63
Fev	4,16	3,93	Ago	2,28	3,37
Mar	2,13	8,1	Set	2,48	5,52
Abr	2,01	3,7	Out	3,32	4,5
Mai	2,33	9,91	Nov	85,71	4,3
Jun	4,84	4,41	Dez	3,54	3,12

Fonte: Autoria própria

A variável PR_W1 representa a probabilidade de um dia úmido seguir um dia seco no mês, obtida pela Equação 54 e seus resultados conforme Tabela 7:

$$PR_W1 = \frac{\text{dias}_{U,s,i}}{\text{dias}_{s,i}} \quad (54)$$

Tabela 7 - Probabilidade de um dia úmido seguir um dia úmido no mês

Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)	Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)
	PR_W1	PR_W1		PR_W1	PR_W1
Jan	0,3	0,15	Jul	0,37	0,27
Fev	0,33	0,2	Ago	0,35	0,18
Mar	0,36	0,2	Set	0,4	0,15
Abr	0,4	0,29	Out	0,32	0,19
Mai	0,28	0,2	Nov	0,28	0,24
Jun	0,3	0,22	Dez	0,29	0,15

Fonte: Autoria própria

Por outro lado, a variável PR_W2 indica a probabilidade de um dia úmido seguir um dia úmido no mês, obtida pela Equação 55 e seus resultados conforme Tabela 8:

$$PR_W2 = \frac{\text{dias}_{U,U,i}}{\text{dias}_{U,i}} \quad (55)$$

Tabela 8 - Probabilidade de um dia úmido seguir um dia úmido no mês

Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)	Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)
	PR_W2	PR_W2		PR_W2	PR_W2
Jan	0,72	0,68	Jul	0,76	0,57
Fev	0,76	0,58	Ago	0,69	0,63
Mar	0,74	0,69	Set	0,71	0,63
Abr	0,7	0,6	Out	0,75	0,62
Mai	0,7	0,62	Nov	0,81	0,75
Jun	0,72	0,57	Dez	0,73	0,71

Fonte: Autoria própria

A média do número de dias com precipitação no mês (PCPD) pode ser obtida pela Equação 56 e seus resultados conforme Tabela 9:

$$PCPD = \frac{\text{dias}_{U,i}}{\text{anos}} \quad (56)$$

Tabela 9 - Média do número de dias com precipitação no mês

Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)	Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)
	PCPD	PCPD		PCPD	PCPD
Jan	17,5	10,91	Jul	20,5	13,18
Fev	16,8	10,18	Ago	18,0	10,91
Mar	19,7	13,18	Set	19,0	9,27
Abr	18,8	13,91	Out	19,2	11,18
Mai	16,5	11,64	Nov	19,7	16,27
Jun	17,2	11,18	Dez	17,6	11,45

Fonte: Autoria própria

RAINHHMX representa a precipitação máxima para meia hora de chuva em todo o período de registro para o mês (mm). Para esse parâmetro fez-se necessário a conversão das alturas pluviométricas dos registros diários para duração de 24 horas, seguido da transformação de 24 horas para 1 hora e, por fim, de 1 hora para 30 minutos. Utilizou-se a relação entre as alturas propostas por CETESB (1986), conforme Tabela 10 a seguir:

Tabela 10 – Relação entre as alturas pluviométricas

Relação entre as alturas pluviométricas	Fatores de Conversão
30 min/ 1h	0,74
1h / 24h	0,42
6h/ 24h	0,72
8h/ 24h	0,78
10h/ 24h	0,82
12h / 24h	0,85
24h/ 1 dia	1,14

Fonte: Adaptado de CETESB (1986)

Os resultados desses parâmetros são apresentados na Tabela 11:

Tabela 11 - Precipitação máxima para meia hora de chuva em todo o período de registro para o mês (mm)

Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)	Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)
	RAINHHMX	RAINHHMX		RAINHHMX	RAINHHMX
Jan	34,227	46,982	Jul	21,117	17,22
Fev	28,345	20,692	Ago	30,825	22,889
Mar	29,691	92,334	Set	17,857	12,188
Abr	17,786	37,486	Out	35,36	49,816
Mai	12,401	71,075	Nov	28,841	64,627
Jun	25,298	19,487	Dez	71,217	46,769

Fonte: Autoria própria

Quanto ao parâmetro SOLARAV, que representa a média da radiação solar diária para cada mês (MJ/m².dia), os valores obtidos são apresentados na Tabela 12 a seguir:

Tabela 12 - Média da radiação solar diária para cada mês (MJ/m².dia)

Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)	Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)
	SOLARAV(MJ)	SOLARAV(MJ)		SOLARAV(MJ)	SOLARAV(MJ)
Jan	1,521	1,652	Jul	0,925	0,993
Fev	1,564	1,714	Ago	1,103	1,158
Mar	1,36	1,464	Set	1,237	1,29
Abr	1,096	1,228	Out	1,137	1,31
Mai	0,951	1,01	Nov	1,172	1,366
Jun	0,895	0,897	Dez	1,544	1,62

Fonte: Autoria própria

A variável DEWPT traduz a média das temperaturas diárias de ponto de orvalho a cada mês (°C) ou da umidade relativa, conforme Tabela 13 a seguir:

Tabela 13 - Média das temperaturas diárias de ponto de orvalho a cada mês (°C)

Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)	Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)
	DEWPT	DEWPT		DEWPT	DEWPT
Jan	17,922	21,164	Jul	14,042	16,672
Fev	18,081	21,261	Ago	13,844	17,246
Mar	18,26	21,288	Set	14,676	17,634
Abr	17,078	20,643	Out	14,802	18,851
Mai	14,943	17,63	Nov	16,231	20,027
Jun	14,57	16,345	Dez	18,31	21,15

Fonte: Autoria própria

A variável WNDV representa a média das velocidades de vento diárias para cada mês (m/s), sendo seus resultados apresentados na Tabela 14 a seguir:

Tabela 14 - Média das velocidades de vento diárias para cada mês (m/s)

Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)	Mês	Santa Teresa (STT)	Vitória (VIX)
	WNDV	WNDV		WNDV	WNDV
Jan	1,678	2,2	Jul	2,031	1,408
Fev	1,566	1,993	Ago	2,094	1,778
Mar	1,778	1,752	Set	2,071	2,167
Abr	1,845	1,568	Out	1,849	2,169
Mai	1,902	1,465	Nov	1,774	2,081
Jun	2,031	1,408	Dez	2,034	2,18

Fonte: Autoria própria

4.3.1.2 Variáveis fisiográficas

As variáveis fisiográficas requeridas pelo SWAT são basicamente:

- Modelo Digital de Elevação (MDE);
- Pedologia;
- Usos e ocupações do solo.

4.3.1.2.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)

O MDE deve ser suficientemente capaz de abranger os limites físicos da bacia e representar todas as elevações da região. Essa variável foi colhida junto ao projeto ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), desenvolvido pelo governo

americano, por meio da NASA (*United States National Aeronautics and Space Administration*) em parceria com METI (*Ministry of Economy, Trade, and Industry of Japan*). Em seu portal *online* é possível obter modelos digitais de elevação com resolução de 30 metros e em arquivo compatível com a leitura GIS.

Já a hidrografia foi obtida através do portal *online* Geobases, mantido pelo Governo do Estado do Espírito Santo e que abriga uma enorme gama de informações espaciais e levantamentos históricos do estado.

Na Figura 3 a seguir é possível observar que a bacia se desenvolve por uma superfície diversificada em termos de altitude, quando a cabeceira do seu rio principal situa-se em cotas próximas de 1.000 metros, atravessa uma declividade acentuada na porção central e caminha em um vale de declividades baixas até desaguar no mar, em cotas próximas a 0 metros.

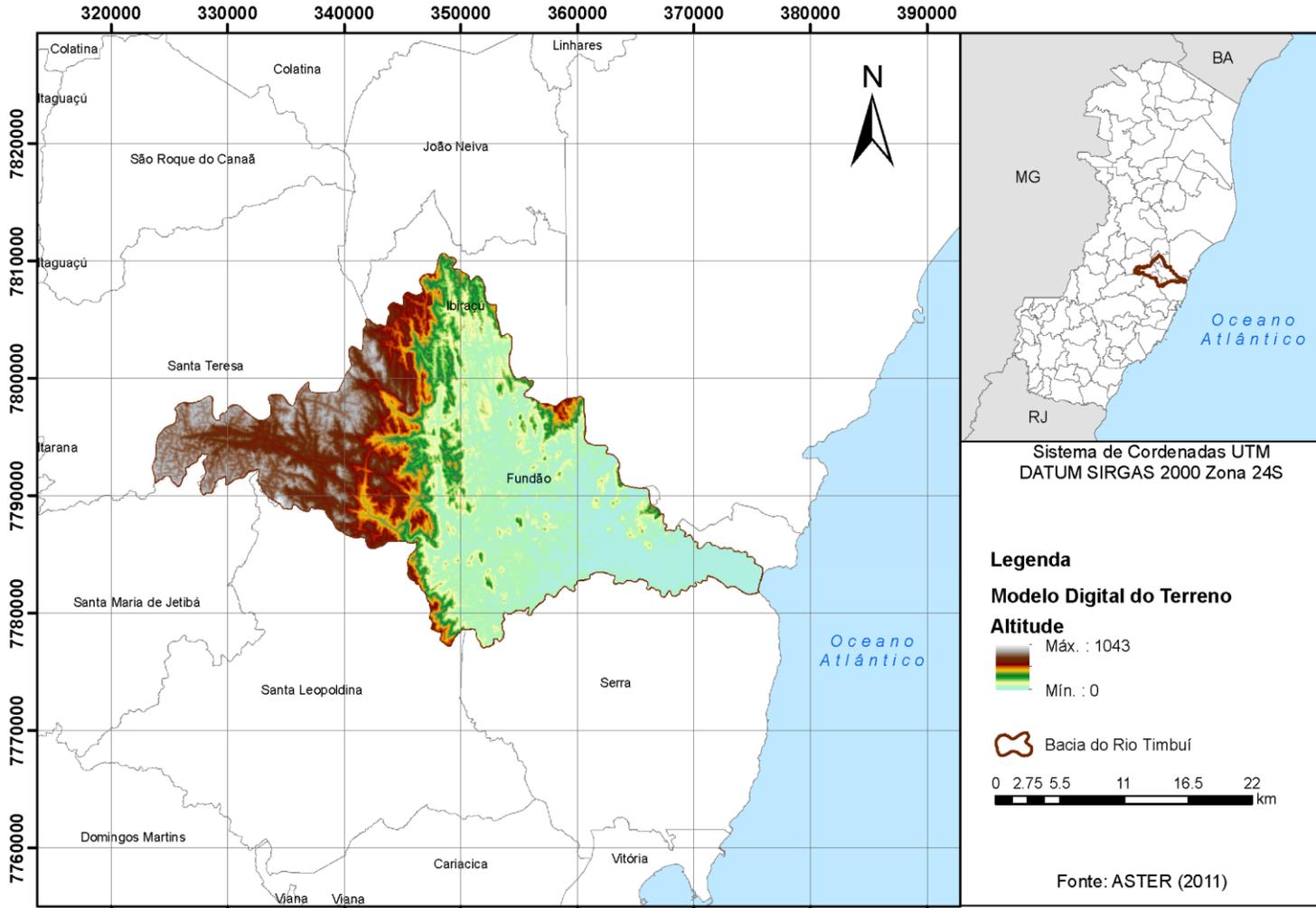


Figura 3 -Mapa do Modelo Digital de Elevação (MDE) para bacia do Rio Timbuí

Fonte: Autoria própria

4.3.1.2.2 Pedologia

Quanto a pedologia, ou seja, o tipo do solo em seu estado natural, os dados originaram-se do levantamento realizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) na década de 1970 e constante no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Esses dados estão disponíveis em escala 1:400.000 e abrange toda a área do Espírito Santo.

Para a bacia em estudo foram levantados 5 tipos diferentes de solo que são detalhados a seguir na Tabela 15, conforme sua predominância na área, em porcentagem.

Tabela 15 – Relação do tipo de solo da bacia em estudo

Código	Tipo de solo	%
LVd12	Latossolo vermelho amarelo distrófico A moderado textura argilosa fase floresta subperenifólia relevo suave ondulado	82,70
Cd1	Associação Cambissolos + Solos Litólicos, fase floresta Mesófila Perenifólia e Semi-decídua Atlântica de Encosta, floresta Higrófila Atlântica de Encosta e Scrub Lenhoso Atlântico, relevo montanhoso e escarpado.	1,06
PV1	Neossolo quartzarênico distrófico A moderado fase arenosa floresta subperenifólia de restinga relevo plano	5,17
HGHd	Associação Gley Húmico e Gley Pocuo Húmico distrófico textura argilosa + Solos Orgânicos distróficos, ambos fase Campos de Várzea, relevo plano	4,23
AMd2	Associação areias quartzosas marinhas distróficas A moderado fase Floresta Esclerófila Litorânea + Podzol Hidromórfico A prominente textura arenosa fase floresta Paludosa litorânea e campos de várzea ambos relevo plano	6,84

Fonte: Autoria própria

Nesse contexto, Moreira (2017) alerta que é necessário inserir no SWAT a nomenclatura dos tipos de solo, bem como suas características pedológicas em função dos parâmetros relacionados com a produção de água, isso pelo fato do modelo apresentar em seu banco dados tipos de solos da América do Norte o que, muitas vezes, não supre a necessidade local do estudo. Com base na fonte de dados colhida pela Embrapa e através das definições pontuadas por Tucci (2014) foram preenchidos os valores de cada variável da pedologia no SWAT que são relacionadas a produção de água na bacia. Essas variáveis foram preenchidas no campo “*Users Soils Edit*” no ArcSWAT e são:

- I. NLAYERS – define o número de horizontes do solo;
- II. HYDGRP – classifica o grupo hidrológico do solo (A, B, C ou D);

- III. SOL_Z – indica a profundidade de cada horizonte do solo (mm);
- IV. SOL_BD – indica a densidade do solo (g/cm³);
- V. SOL_AWC – representa a quantidade de água disponível para as plantas (mm/mm);
- VI. SOL_K – indica a condutividade hidráulica do solo (mm/h);
- VII. CLAY – indica porcentagem de argila no solo (%);
- VIII. SAND – indica a porcentagem de areia no solo (%);
- IX. SILT – indica a porcentagem de silte no solo (%);
- X. ROCK – indica a porcentagem de cascalho no solo (%);
- XI. SOL_ALB – indica o albedo do solo, ou seja, a capacidade de reflexão da radiação solar no solo.

É importante salientar que as variáveis de II a XI foram alimentadas para cada tipo de horizonte de solo definido em I.

Quanto a classificação do grupo hidrológico do solo usou-se a referência de Tucci (2014) que se descreve nas Tabelas 16 e 17 a seguir:

Tabela 16 – Classificação pedológica nos grupos hidrológicos de solo A, B, C e D (continua)

Grupo hidrológico do solo	Classes gerais de solo
A	LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.
B	LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZÊNICO; ARGILOSSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa, argilosa/muito argilosa, que não apresentam mudança textural abrupta.

Fonte: Tucci (2014).

Tabela 17 – Classificação pedológica nos grupos hidrológicos de solo A, B, C e D
(conclusão)

Grupo hidrológico do solo	Classes gerais de solo
C	ARGILOSSOLOS pouco profundos, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGILOSSOLO VERMELHO, ARGILOSO; VERMELHO AMARELO e ARGILOSSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural; CAMBISSOLO de textura média e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO; ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.
D	NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO, SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no grupo C; ARGILOSSOLO VERMELHO AMARELO e ARGILOSO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.

Fonte: Tucci (2014).

Quanto aos valores do parâmetro SOL_AWC buscou-se estimá-los através da umidade equivalente para cada tipo de solo referenciados por Embrapa (1978). Segundo Dias Junior; Bertoni; Bastos (2000), a umidade equivalente (EU) do solo pode ser entendida como a umidade que uma amostra de solo retém quando, depois de saturada, é submetida por trinta minutos, com velocidade de até mil vezes maior que a gravidade. Além disso, através dela pode ser estimada a capacidade de campo (FC) e a geração de água no ponto de murcha permanente (WP), através da Equação 57 e Equação 58:

$$WP = 0,68 \times EU \quad (57)$$

$$FC = 1,3 \times EU \quad (58)$$

Onde:

WP: ponto de murcha permanente, em mm/mm;

EU: umidade equivalente, em mm;

FC: capacidade de campo, em mm.

Conforme exposto na revisão da literatura deste estudo, a quantidade de água disponível para a vegetação, correspondente ao parâmetro SOL_AWC, consiste na diferença do valor da capacidade de campo (FC) e o valor da fração de água no ponto de murcha permanente (WP). Logo o parâmetro SOL_AWC pode ser obtido através da Equação 59:

$$SOL_AWC=1,3\times UE-0,68\times UE \quad (59)$$

Os demais parâmetros, SOL_Z, SOL_BD, CLAY, SAND, SILT e ROCK foram obtidos de forma direta através de amostragens do levantamento do solo realizado pelo Embrapa, exceto pelo parâmetro SOL_K que pôde ser obtido através da textura do solo.

Para essa determinação de texturas dos solos utilizou-se o triângulo textural desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS).

A Figura 4 a seguir ilustra esse triângulo:

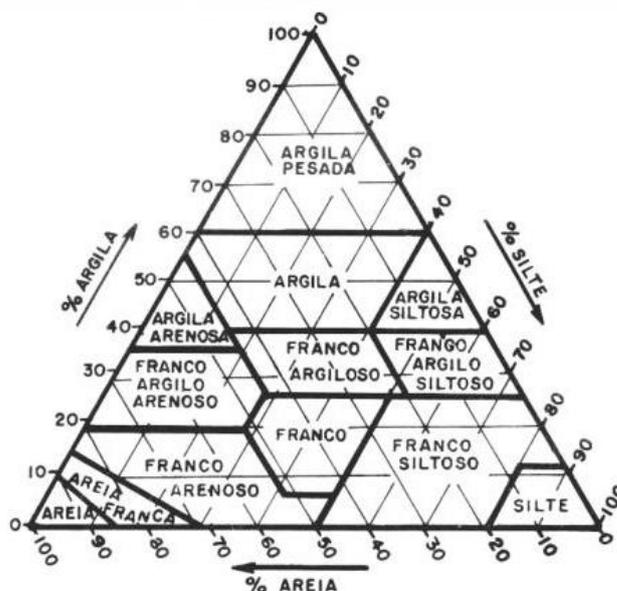


Figura 4 – Triângulo de classificação das classes texturais do solo, adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Fonte: adaptado de SCS, 1987

A representação ilustrada da pedologia na bacia do Rio Timbuí é apresentada na Figura 5 seguir:

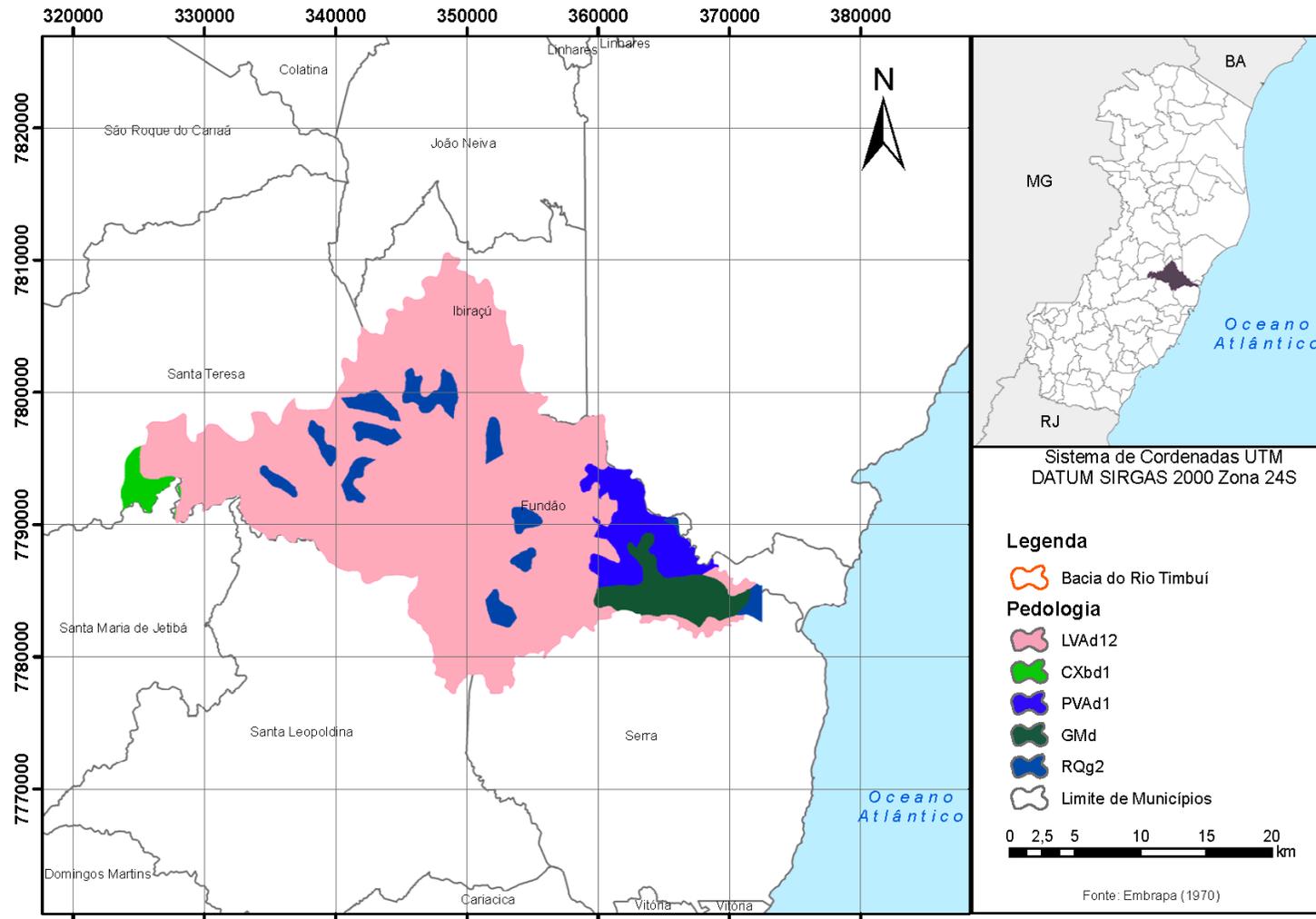


Figura 5 - Mapa da Pedologia para bacia do Rio Timbuí

Fonte: Autoria própria

4.3.1.2.3 Usos e Ocupações do Solo

Por fim, a delimitação de áreas indicadoras do uso e ocupação do solo pôde ser processada através de Ortofotomosaico na escala 1:15.000, datado de junho de 2007 e fornecido pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA).

Na Figura 6 a seguir é possível constatar que a bacia pode ser caracterizada como tipicamente ruralista, com alta ocupação mata nativa e outros.

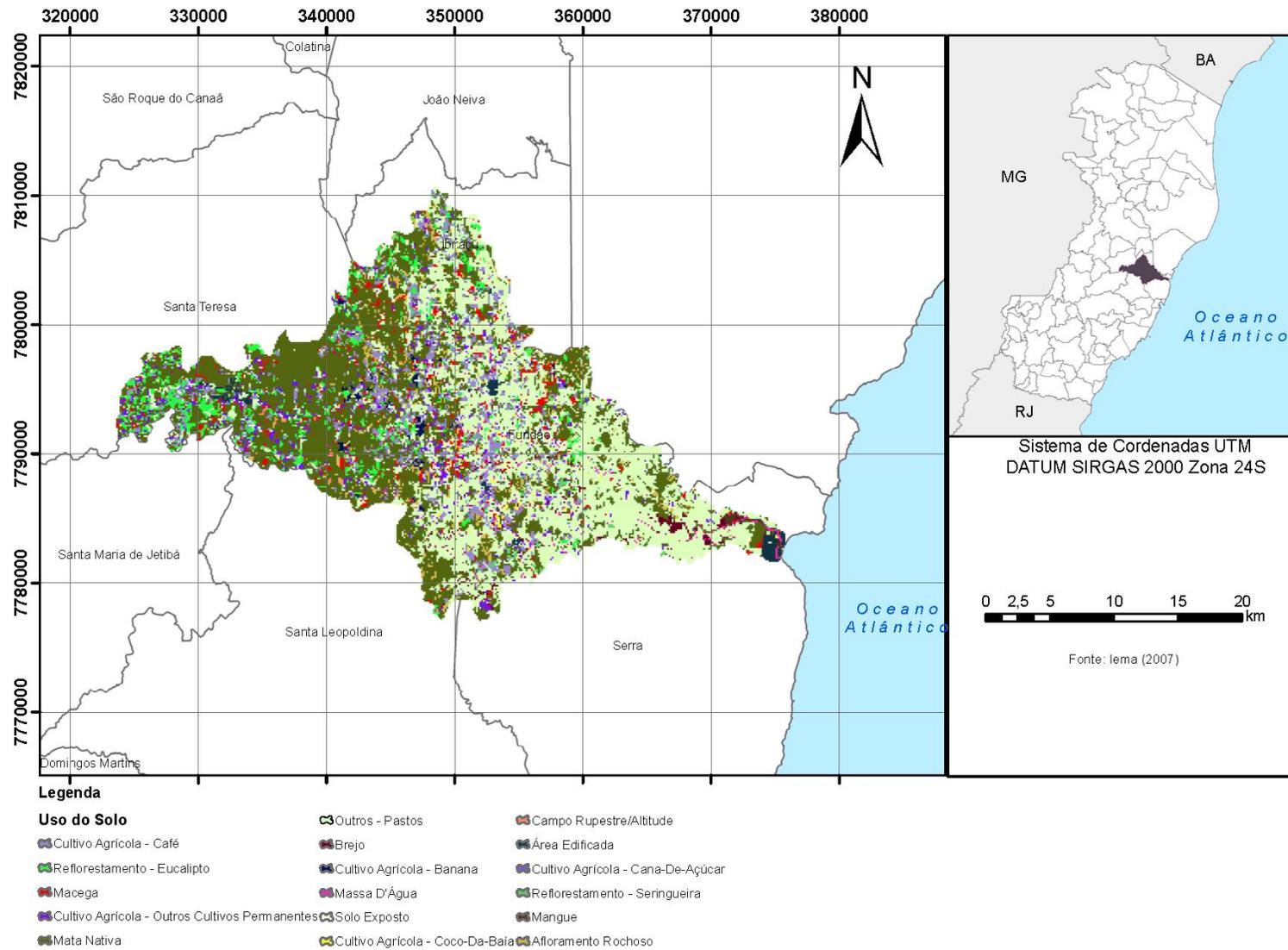


Figura 6 - Mapa dos Usos e Ocupações do Solo para bacia do Rio Timbuí

Fonte: Autoria própria

De forma gráfica os diversos tipos de usos e ocupações do solo na área a bacia apresentam-se na Figura 7 a seguir:

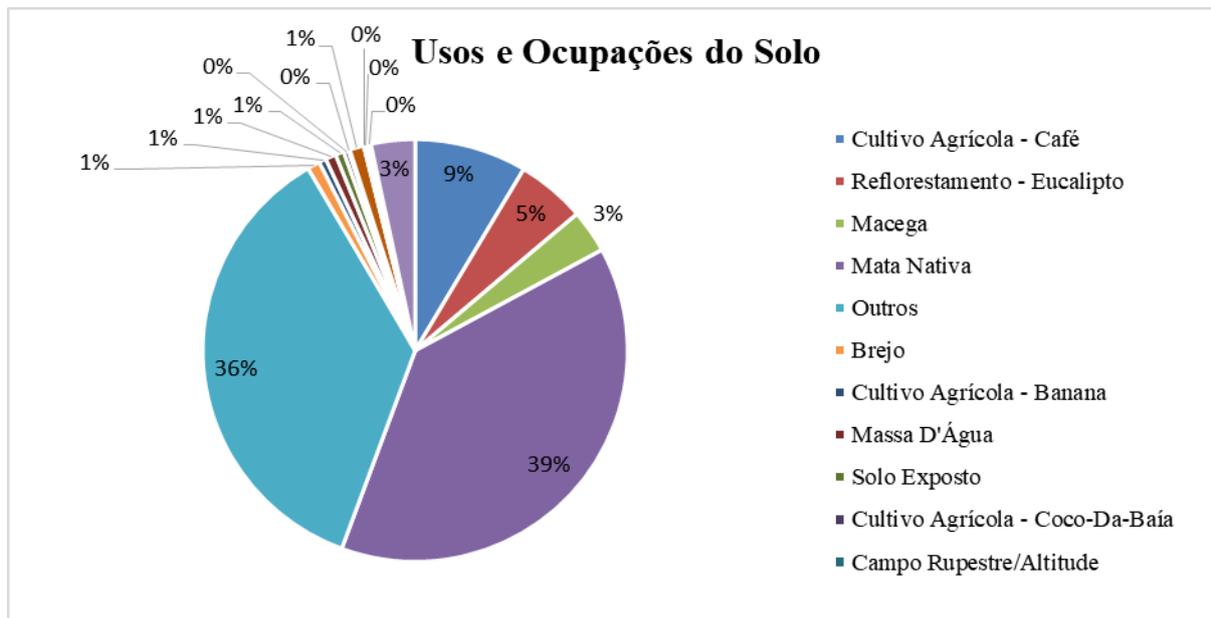


Figura 7 - Distribuição do uso e ocupação de solo na bacia
Fonte: Autoria própria

Aproximadamente 75% da bacia do Rio Timbuí é constituída por dois tipos de uso de solo: Mata Nativa e Outros (basicamente composta de chácaras, construções, pastos, vegetação isolada, etc).

É perceptível, através do mapa de uso e ocupações do solo (Figura 6), que a maior parte de mata nativa, que representa 36% de ocupação, está concentrada na porção oeste da bacia, principalmente na região serrana. Por outro lado, da porção central em caminho ao litoral a ocupação do solo passa a ser predominantemente classificada como “outros”, o que traz certa incerteza para os estudos, visto que podem ser de diversos usos.

Através de imagens aéreas buscou-se estudar as variações desse uso e foram encontradas diversas regiões com pastos, áreas desmatadas, estradas e pequenas porções de vegetação mais robustas, principalmente nos talwegues que permeiam a bacia.

Há de se atentar que essa variável física, dentre tantas outras, é a mais suscetível à mudança ao longo do tempo, uma vez que culturas são, em geral, rotativas. Essa mudança pode gerar variações quanto a produção de água na bacia, bem como citado por Schmalz e Fohrer (2009), quando afirmam que a sensibilidade dos parâmetros é influenciada, especialmente, pelo uso e ocupação do solo.

Para atender a necessidade de dados de entrada no SWAT foram atribuídos parâmetros para cada informação de uso do solo. Segundo Moreira (2017) a ausência de dados locais torna

necessário o uso daqueles americanos, exceto par ao fator CN que pode ser atribuído para cada grupo hidrológico do solo.

Esses parâmetros são listados a seguir, em conformidade com o citado no manual do SWAT (NEITSCH et al., 2011):

- BLAI - índice máximo de área foliar;
- FRGRW1 - fração de potenciais de unidades de calor acumuladas para a planta em um determinado dia na fase vegetativa;
- FRGRW2 - fração da fase vegetativa do 2º ponto da curva de desenvolvimento ideal da área foliar
- DLAI - fração da fase vegetativa na qual a senescência se torna o processo de crescimento dominante;
- CHTMX - altura máxima do dossel;
- GSI – máxima condutância estomática na alta radiação solar e baixo déficit de pressão de vapor;
- VPDFR – déficit de pressão de vapor;
- OV_N – valor de Manning;
- CN2A – CN na condição 2 do solo A;
- CN2B – CN na condição 2 do solo B;
- CN2C – CN na condição 2 do solo C;
- CN2D – CN na condição 2 do solo D;
- ALAI_MIN – índice de área mínima foliar;
- BIO_LEAF – fração da biomassa acumulada no vegetal;
- BM_DIEOFF – fração de biomassa morta.

Para os valores de CN utilizou-se a equivalência entre cada tipo de uso e ocupação do solo (oriundos do IEMA) e os do SCS. Essa correlação foi proposta e utilizada por Moreira (2017).

Tabela 18 - Valores de CN para usos e ocupações do solo para bacia do Rio Timbuí

Uso do solo (IEMA)	Uso do solo (Livre tradução das tabelas do SCS)	A	B	C	D
Cultivo Agrícola - Café	Detritos de florestas, árvores pequenas (condições hidrológicas pobres)	45	66	77	83
Reflorestamento - Eucalipto	Matas roçadas, mas não queimadas (condições hidrológicas razoáveis)	36	60	73	79
Macega	Terreno com ervas daninhas 50% a 75% de cobertura do solo (condições hidrológicas razoáveis)	35	56	70	77
Mata nativa	Matas protegidas (condições hidrológicas boas)	30	55	70	77
Outros	Chácaras, construções, estradas, lotes	59	74	82	86
Brejo	Pastagem 50% a 75% de cobertura do solo (condições hidrológicas razoáveis)	49	69	79	84
Cultivo Agrícola - Banana	Detritos de florestas, árvores pequenas (condições hidrológicas pobres)	45	66	77	83
Massa d'água	Área impermeável	92	92	92	92
Solo exposto	Solo descoberto	77	86	91	94
Cultivo Agrícola - Coco da Bahia	Detritos de florestas, árvores pequenas (condições hidrológicas pobres)	45	66	77	83
Campo rupestre/ altitude	Terreno com ervas daninhas > 75% de cobertura do solo (condições hidrológicas razoáveis)	30	48	65	73

Fonte: Adaptado de Moreira (2017)

4.3.1.3 Variáveis fluviométricas

A estação fluviométrica selecionada foi a de Valsugana Velha-Montante (código 570400008) cujos dados de vazão foram extraídos da Agência Nacional de Águas (ANA).

A estação está localizada no município de Santa Teresa, no Espírito Santo, nas coordenadas latitude $-19,96^\circ$ e longitude $-40,54^\circ$. Apresenta uma área de drenagem de contribuição a montante de 88 km², de responsabilidade da ANA e operação da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Os dados disponíveis abrangem uma série histórica de 01 de agosto de 1984 a 01 de fevereiro de 2016.

A Figura 8 a seguir ilustra a posição da estação das estações fluviométrica da região, com destaque para a de Valsugana Velha-Montante:

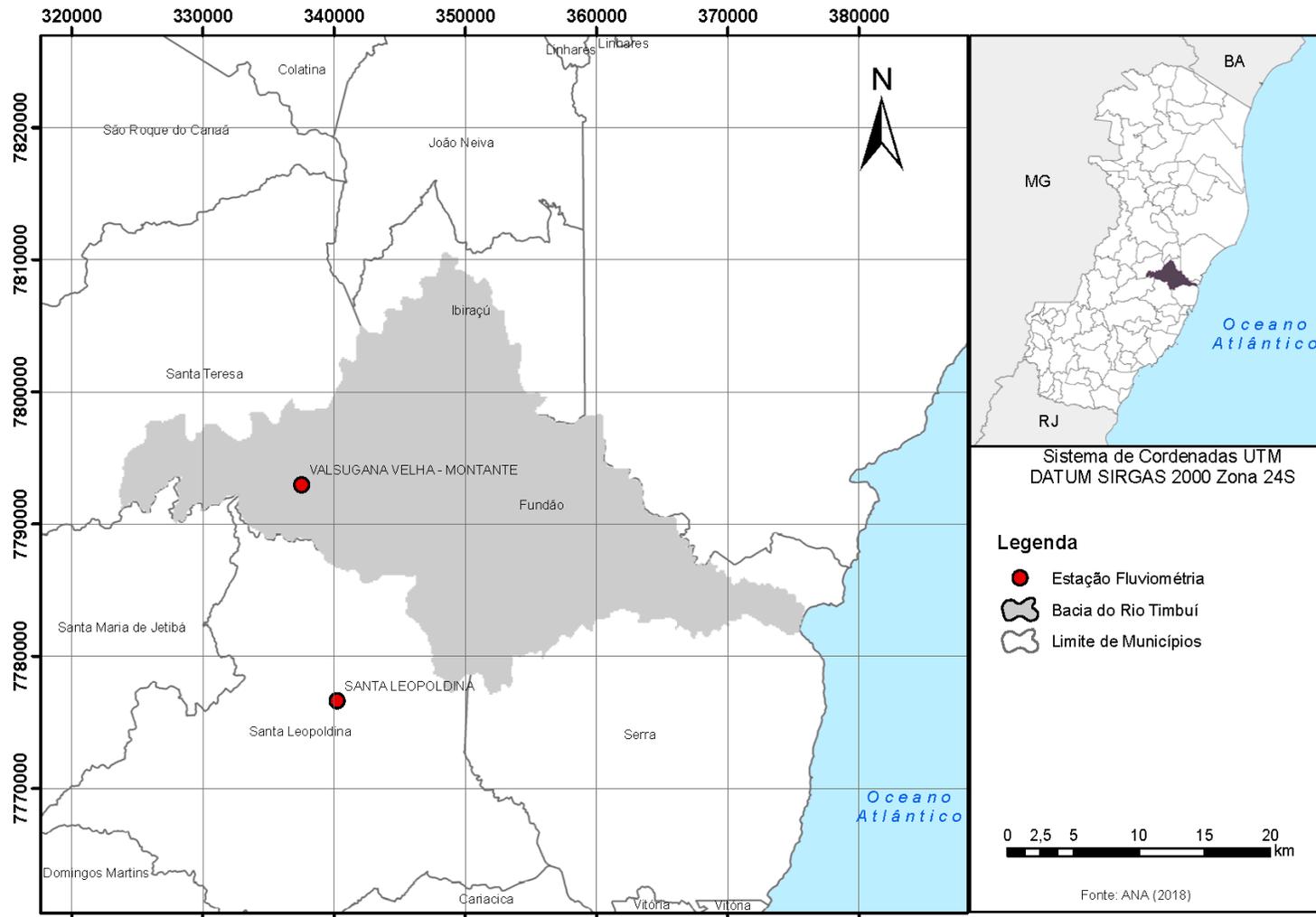


Figura 8 - Mapa com localização das Estações Fluviométricas (ANA) – Valsugana Velha-Montante

Fonte: Autoria própria

4.3.2 Aplicação do modelo SWAT

Após a obtenção de todos os dados de entrada descritos no item anterior tornar-se-á possível a aplicação do modelo SWAT na estimativa de vazões para a bacia do Rio Timbuí. Os passos realizados para essa aplicação são elencados a seguir:

1. Delineamento da bacia hidrográfica através do Modelo Digital de Elevação (MDE), além do cálculo da direção do fluxo de drenagem, fluxo de drenagem acumulado, limites físicos da bacia, rede de drenagem e suas respectivas sub-bacias com exutórios;
2. Definição das unidades de resposta hidrológica (HRU's) através da ferramenta HRU Analysis do ArcSWAT, que consiste na combinação entre as sub-bacias, do uso da terra, do tipo de solo (pedologia) e das classes da declividade. O processo de formação das HRU's pode ser visto na Figura 9.

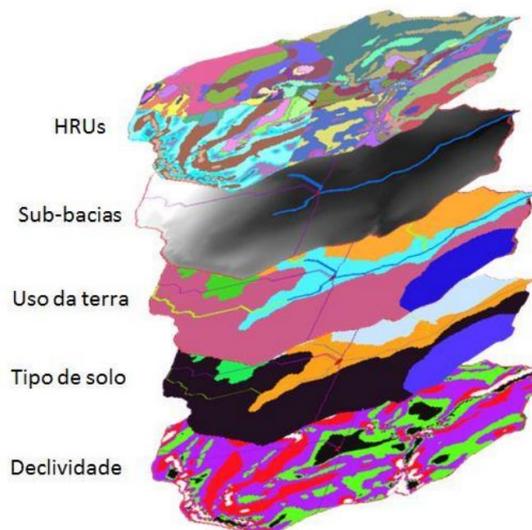


Figura 9 - Ilustração de formação das Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's)

Fonte: Fukunaga (2012)

3. Inserção das variáveis climáticas como precipitação, temperatura do ar (máximas e mínimas), umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento. Neste passo caberá a inserção dos valores de parâmetros estatísticos, responsáveis pela geração de dados para preenchimento de falhas da série;
4. Simulação do modelo SWAT, com o fornecimento dos períodos de aquecimento e de simulação, passo de tempo da simulação (neste caso diário), bem como a escolha dos dados de saída de interesse.

Buscou-se utilizar o máximo período de tempo possível de séries históricas para o processamento do SWAT. Entretanto, limitando-se aos intervalos coincidentes e disponíveis

utilizou-se o intervalo de 2006 a 2015, sendo o primeiro ano posto como período de aquecimento do modelo. Esse período de aquecimento consiste em um tempo necessário para que o modelo equalize as incertezas quanto às condições iniciais de alguns parâmetros, tais como umidade inicial, crescimento vegetativo, etc.

Por isso, os resultados válidos e utilizados nesta pesquisa são de 9 anos, tomando como 2006 o ano de aquecimento, 2007 como primeiro ano de simulação de 2015 como último.

É importante salientar que ainda que um dos objetivos deste trabalho fosse utilizar os dados de vazão do SWAT como ferramenta para determinação de vazões mínimas de referência, utilizou-se os melhores resultados dentre as tentativas de calibração da vazão estimada pelo SWAT após a simulação, ou seja, sem ajuste fino do modelo, ainda que esses resultados não tenham alcançado valores satisfatórios conforme a literatura (item a ser abordado adiante).

4.3.3 Análise de Sensibilidade

Antecedendo a calibração do modelo SWAT se fez necessário a análise da sensibilidade a fim de se concentrar apenas nos parâmetros de maior relevância e, conseqüentemente, nos respectivos dados de saída para uma determinada condição de simulação. Assim, a análise de sensibilidade buscou classificar os parâmetros que podem ser ajustáveis de acordo com o grau de impacto sobre a variável do modelo influenciada pelo parâmetro.

Paralelamente a calibração o software SWAT-CUP executa, através do algoritmo SUFI2, a rotina de análise de sensibilidade dos parâmetros. Por esse motivo é necessário a inserção tanto dos dados de vazões monitoradas no posto fluviométrico quanto daqueles estimados pelo SWAT, uma vez que a sensibilidade é estimada de acordo com as variações na função objetivo que avalia a eficácia da calibração do modelo.

No SWAT há 20 parâmetros que exercem influência na simulação da vazão o que torna inviável trabalhar o processo de calibração em todos, levando a prática de uma redução naqueles mais sensíveis a fim de seguir o princípio da parcimônia (MULETA e NICKLOW, 2005).

Segundo Moreira (2017) os parâmetros que estão intimamente ligados a produção de água no SWAT são os listados na Tabela 19. Cada parâmetro apresenta um limite inferior (LI) e um limite superior (LS) que enquadra os valores para ajustes, além de serem classificados conforme o método de variação dos valores no processo de calibração (substituição, adição de um valor absoluto ou multiplicação).

Tabela 19 - Parâmetros da análise de sensibilidade relacionados à produção de água

Parâmetro	Descrição	Unidade	LI	LS	Método de Variação
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base	dia	0	1	Substituição
BIOMIX	Eficiência da mistura biológica do solo	adimensional	0	1	Substituição
BLAI	Índice máximo de área foliar	m ² /m ²	0	1	Substituição
CANMX	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação	mm	0	10	Substituição
CH_K2	Condutividade hidráulica do canal	mm/h	0	150	Substituição
CH_N2	Coefficiente de Manning no canal principal	s/m ³	0	1	Substituição
CN2	Número da curva para condição de umidade II	adimensional	-25%	25%	Multiplificação
EPCO	Fator de compensação da remoção de água pelas raízes	adimensional	0	1	Substituição
ESCO	Fator de compensação da evaporação no solo	adimensional	0	1	Substituição
GW_DELAY	Tempo de recarga do aquífero raso	dia	-10	10	Adição
GW_REVAP	Coefficiente de ascensão da água da zona de saturação	adimensional	-0,04	0,036	Adição
GWQMN	Profundidade do aquífero raso para escoamento de base	mm	-1000	1000	Adição
REVAPMN	Profundidade da água no aquífero raso para que ocorra percolação	mm	-100	100	Adição
SLSUBBSN	Comprimento médio da rampa de declividade	m	-25%	25%	Multiplificação
SOL_ALB	Fração de albedo do solo na capacidade de campo	adimensional	-25%	25%	Multiplificação
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no horizonte do solo	mm/mm	-25%	25%	Multiplificação
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo	mm/h	-25%	25%	Multiplificação
SOL_Z	Profundidade da superfície até a base do horizonte do solo	mm	-25%	25%	Multiplificação
SURLAG	Tempo de retardo do escoamento superficial	dia	0	10	Substituição
TLAPS	Taxa de variação da temperatura com relação à altitude	°C/Km	0	50	Substituição

Fonte: Adaptado de Moreira (2017)

O SWAT apresenta cinco outros parâmetros que se relacionam com a produção de água (SFTMP, SMFMN, SMFMX, SMTMP e SMTMP), porém suas características giram em torno de ocorrência de neve e, pelo fato da bacia estudada localizar-se em uma região tropical, esses não foram incluídos no processo de análise de sensibilidade e calibração do modelo.

Souza (2011), ao estudar a estimativa de vazões mínimas com o modelo SWAT, listou os parâmetros que mais influenciam no processo de calibração das vazões mínimas. Para este autor o parâmetro ALPHA_BF tem relação direta com as recessões do hidrograma e, portanto, é um fator de substancial importância nos estudos de vazões mínimas.

Em uma chuva, a interceptação pelo dossel reduz a energia erosiva das gotas e armazena uma parcela do volume precipitado no próprio dossel, assim o parâmetro CANMX afeta significativamente a infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração.

A curva-número dada pelo CN2 corresponde um comportamento da permeabilidade do solo, bem como o uso do solo e as condições antecedentes de umidade do solo. Esse parâmetro está relacionado com a infiltração e o escoamento superficial na bacia.

O coeficiente de compensação da evaporação no solo, ESCO, é dado pela diferença entre as demandas evaporativas calculadas nos limites superior e inferior de cada camada.

O parâmetro que controla o tempo de recarga do aquífero é o GW_DELAY, o qual se relaciona com o escoamento de base. No contexto de vazões mínimas este parâmetro tem substancial sensibilidade no processo de calibração.

Ao controlar o fluxo de água da zona saturada (aquífero) o parâmetro GW_REVAP influencia a dinâmica da água subterrânea na bacia e, por isso, apresenta estreita relação com as vazões mínimas.

O parâmetro SLSUNNSN controla o comprimento médio da encosta de cada HRU. Ainda que esse comprimento, sendo um elemento físico da bacia, esteja na ordem de escala do mapeamento ou da própria modelagem, pode ser ajustado ao longo da modelagem. Tal parâmetro influencia diretamente na taxa de pico do escoamento, no escoamento superficial e na produção de sedimentos.

Já o parâmetro SOL_AWC controla a quantidade de água disponível nas camadas de solo para extração das plantas, sendo calculado pela diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha. Como esse parâmetro relaciona-se com os processos de percolação, evaporação e dinâmica da água subterrânea na bacia, seus valores influenciam diretamente nas vazões mínimas.

Quanto à condutividade hidráulica saturada, o parâmetro de controle é o SOL_K. A condutividade hidráulica é uma característica física do solo que pode ser medida em campo e

que fornece informações sobre o movimento da água entre os grãos do solo. Todavia, pelo fato dos solos apresentarem uma distribuição espacial irregular, os mapeamentos, em virtude da escala, não são capazes de representar fidedignamente os dados. Por isso, a estimativa e correção desta propriedade através de parâmetros hidrológicos é comum. A influência da condutividade hidráulica no modelo está ligada aos processos de percolação, de fluxo lateral e à dinâmica da água subterrânea.

Por fim, o parâmetro que controla a declividade média de cada sub-bacia é o SLOPE. Este parâmetro apresenta influência sobre a taxa de escoamento de pico, fluxo lateral, produção de sedimentos e escoamento superficial.

Por serem necessárias diversas iterações no SWAT-CUP até se obter valores razoáveis para a calibração os resultados de *t-stat* e *p-value* da análise de sensibilidade foram utilizados daquela interação que apresentou valores mais satisfatórios possíveis de calibração.

4.3.4 Calibração

Ainda com o uso do *software* SWAT-CUP foram realizados testes de calibração com o objetivo de se obter valores de coeficientes de desempenho satisfatório e/ou que pudessem subsidiar a continuação do estudo de determinação de vazões mínimas de referência, objetivo deste trabalho.

O primeiro passo no SWAT-CUP foi a escolha do algoritmo a ser utilizado na calibração, sendo neste estudo o SUFI2. Por conseguinte, buscou-se no banco de dados de saída do modelo SWAT o arquivo o qual continha os valores de vazão simulados, já descontando o período de aquecimento requerido outrora pelo SWAT, ou seja, a calibração se deu apenas no período efetivamente simulado, de 2007 a 2015.

Considerando uma série histórica curta de dados fluviométricos monitorados foram realizadas 500 interações em cada simulação, tendo sido transportados os resultados de uma interação para àquela subsequente. Por fim, na avaliação dos resultados obtidos no processo de calibração escolheu-se uma função objetivo largamente utilizada em processos de modelagem hidrológica: Coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE).

4.4 SEGUNDA ETAPA: DETERMINAÇÃO DA VAZÃO Q_{90} COM DADOS MODELADOS NO SWAT

Para a determinação da vazão mínima de referência Q_{90} foram utilizados os dados oriundos da modelagem do SWAT para vazões diárias. A sequência executiva para tratamento dos dados, proposta por Von Sperling (2014), é:

- Ordenar os dados diários de vazões simuladas em ordem crescente, de forma que o maior valor de vazão da série ocupe a posição $m=1$ e o menor a posição $m=N$;
- Calcular a probabilidade de cada evento ser superado por uma vazão maior. Isso se faz através da razão entre o valor e o número total de dados, ou seja, N ;
- Com isso confeccionar uma curva de permanência, onde o eixo das abcissas é ocupado pela probabilidade calculada e o eixo das ordenadas pela vazão correspondente;
- Tanto pela tabela quanto pela curva construída pode-se buscar a probabilidade igual ou imediatamente superior a 90% e associá-la a uma vazão. Esta será tida como Q_{90} .

4.5 TERCEIRA ETAPA: DETERMINAÇÃO DA VAZÃO Q_{90} COM EQUAÇÕES DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

Ambas equações de regionalização de vazões mínimas (Q_{90}) abordadas pelos autores referenciados no item 3.5.2.1 (Trabalhos desenvolvidos para região em estudo) são dependentes de variáveis físicas: área de drenagem, comprimento do rio principal e declividade da bacia; e uma variável climática: precipitação média anual.

Com o objetivo de extrair todos os dados de entrada de um mesmo banco de dados utilizou-se o próprio modelo gerado no ArcMAP, com auxílio do SWAT para extração das variáveis físicas e para os dados de precipitação média anual foram utilizados os dados obtidos para a região no trabalho de Pogian (2016), o qual utilizou a equação proposta por Euclides et al. (2007). Isso permitiu uma equidade de informações independentemente do método utilização para obtenção da vazão.

A equação proposta por Ferreira (2010) toma como variáveis a área de drenagem, a declividade da bacia comprimento do talvegue principal a montante donde se pretende estimar a vazão, sendo exposta a seguir:

$$Q_{90} = 1,02514 \times 10^2 \times L^{1,04} \times S_m^{10,5} \quad (60)$$

Onde:

L = comprimento do rio principal, em km;

S_m = declividade média da bacia, em m/m;

Q_{90} = Vazão de referência em m³/s.

A partir dos trechos de drenagem (*Reach*) gerados pelo ArcSWAT obteve-se o comprimento do rio principal (L).

Segundo a orientação de Ferreira (2010), a declividade da bacia deve ser estimada através do cálculo da média aritmética das declividades de cada sub-bacia a montante do ponto de interesse. Essa ação pôde ser realizada de forma automática ao se extrair os dados oriundo do mapa “*LandSlope*” gerado pelo ArcSWAT. Sua unidade de entrada é em m/m.

Semelhantemente, Euclides et al. (2007) propõem em seu estudo uma equação que toma variáveis a área de drenagem e a precipitação média anual da bacia, segundo apresentado a seguir:

$$Q_{90} = 4,47 \times 10^{-11} \times A^{0,0484} \times P_m^{2,5638} \quad (61)$$

Onde:

A = Área de drenagem, em km²;

P_m = Precipitação média anual na bacia, em mm;

Q_{90} = Vazão de referência, em m³/s.

A área de drenagem (A) foi obtida através da soma de cada sub-bacia a montante do ponto donde se pretende estimar a vazão com auxílio do mapa gerado pelo ArcSWAT.

Para efeito de cálculo, a precipitação média anual para o ponto de interesse foi adotada como àquela resultante do método de Polígono de Thiessen para as estações mais próximas e apresentada por Pogian (2016) em seu trabalho, sendo igual a 1313,8 mm. Tal autor utilizou duas estações pluviométricas mantidas pela ANA (Valsugana Velha – Montante – código 19400010 e Caldeirão – código 01940020).

Definida a metodologia aplicada neste trabalho, a seguir demonstra-se os resultados de cada etapa preconizada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em alinhamento ao objetivo da pesquisa demonstrar-se-á neste capítulo os resultados oriundos das simulações realizadas através da modelagem com o SWAT (primeira e segunda etapa), e das equações de regionalização de vazão propostas por Euclides et al. (2007) e Ferreira (2010) (terceira etapa). Adicionalmente, para comparação das vazões com os métodos propostos, utilizou-se o valor de Q_{90} aferido pelo IEMA e utilizado atualmente em processos de outorga na região em estudo.

De forma a expor analiticamente os resultados, serão abordados duas sub-bacias para a comparação.

A primeira sub-bacia, nomeada de 115, é onde se localiza a estação fluviométrica de Valsugana Velha-Montante, com dados históricos de monitoramento. Nesse local é esperado que as vazões obtidas através das equações de regionalização apresentem poucas discrepâncias quanto em valores, uma vez que essa mesma estação foi utilizada para a determinação das equações dos dois autores referenciados.

Já a segunda sub-bacia, 207, foi escolhida estrategicamente mais próxima ao exutório da bacia no mar, ou seja, num local mais distante do posto de monitoramento e com características climáticas e topográficas bem mais distintas do que àquelas encontradas na sub-bacia 115. Essa escolha é estratégica visto que pôde pôr em cheque a confiabilidade tanto do modelo SWAT quanto das equações.

5.1. RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA: VAZÕES ESTIMADAS PELO SWAT

Os resultados da primeira etapa podem ser particionados em análise de sensibilidade dos parâmetros simulados, calibração dos mesmos e vazões finais estimadas pelo SWAT.

No SWAT-CUP foram realizadas 5 simulações com 500 iterações cada, porém a cada simulação foi percebido uma divergência dos valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE), quando ao invés de se aproximarem do valor mínimo tido como satisfatório (0,50), se afastavam a cada simulação. Diversos autores como Baldissera (2005), Salles (2012), Fukunaga (2012) e Moreira (2017) relatam a dificuldade em calibração do modelo quanto a produção de água o que, em muitas vezes, torna-se um processo demorado e, geralmente, com resultados insatisfatórios.

Como não foi objetivo deste estudo aprofundar-se nas causas e possíveis hipóteses da divergência do coeficiente COE, optou-se pelo uso da simulação que apresentou valores mais próximos possíveis daquele enquadrado como satisfatório. Na melhor simulação obteve-se uma

valor de COE igual a 0,17, ou seja, inferior ao mínimo de 0,50 exposto anteriormente na Tabela 1.

5.1.1. Análise de sensibilidade

Na Figura 10, extraída do próprio SWAT-CUP, é possível observar graficamente a disposição dos valores de *t-stat* e *p-value* relacionados segundo a sensibilidade de cada parâmetro, para a análise global.

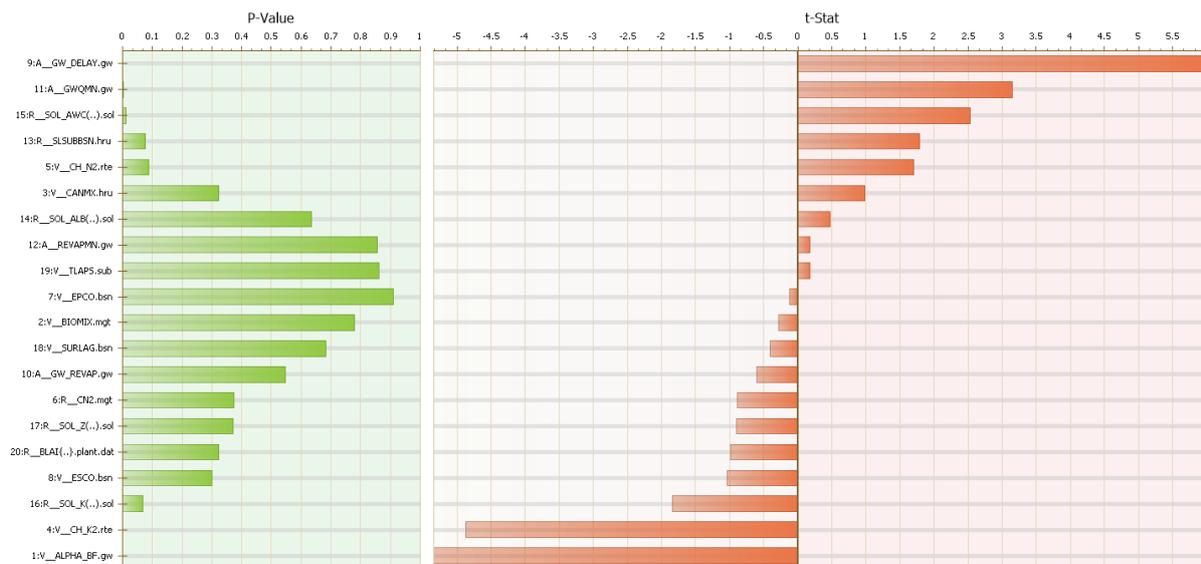


Figura 10 - Resultado gráfico da análise de sensibilidade dos parâmetros (SWAT-CUP)

Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 20 a seguir apresenta-se a classificação dos parâmetros de acordo com o trabalho de Van Griensven et al. (2006), que categoriza os parâmetros segundo a sensibilidade, levando em consideração os 26 parâmetros relacionados à produção de água.

Tabela 20 - Classificação da sensibilidade dos parâmetros

Categoria	Classificação do Parâmetro
Muito importante	1
Importante	2 - 6
Ligeiramente Importante	7 - 19
Insatisfatória	20 - 26

Fonte: Adaptado de Van Griensven et al. (2006)

Isso posto foi possível categorizar os 20 parâmetros simulados neste trabalho em ordem de decrescente de importância:

Tabela 21 - Categorização dos parâmetros quanto a sensibilidade

Posição	Parâmetro	Categoria	Posição	Parâmetro	Categoria
1	GW_DELAY	Muito importante	11	BIOMIX	Ligeiramente importante
2	GWQMN	Importante	12	SURLAG	
3	SOL_AWC		13	GW_REVAP	
4	SLSUBBSN		14	CN2	
5	CH_N2		15	SOL_Z	
6	CANMX		16	BLAI	
7	SOL_ALB	Ligeiramente importante	17	ESCO	
8	REVAPMN		18	SOL_K	
9	TLAPS		19	CH_K2	
10	EPCO		20	ALPHA_BF	

Fonte: Autoria Própria

Percebe-se que o parâmetro mais sensível do modelo na simulação foi o GW_DELAY, que controla o tempo de recarga do aquífero raso. Em seguida, categorizado como importante, encontram-se GWQMN, SOL_AWC, SLSUBBSN, CH_N2 e CANMX, sendo os dois primeiros relacionados com o aquífero raso e capacidade de água no solo; o terceiro com a declividade; o quarto com o coeficiente de Manning no canal principal e, o último, com a quantidade de água interceptada pelo dossel da vegetação.

5.1.2. Calibração

Ainda que realizada a simulação com os parâmetros mais sensíveis, o processo não atingiu resultados satisfatórios quando à luz do que preconiza Moriasi et al. (2007) ao determinar um valor mínimo de COE igual a 0,50 para que se classifique o desempenho da modelagem em satisfatório. Conforme citado anteriormente, a simulação mais próxima desse valor apresentou valor de COE igual a 0,17.

Diversos fatores podem estar relacionados com os baixos valores de correlação entre as vazões monitoradas e as estimadas pelo SWAT, que faz com que os valores de COE não atinjam níveis minimamente satisfatórios. Fukunaga (2012) atribui a ineficiência da estimativa de vazões pelo SWAT, para seu estudo, a alta frequência de falhas no monitoramento fluviométrico. Já Moreira (2017) indicou que a superestimava estava ligada a nível de detalhamento dos dados de entrada, principalmente com relação a pedologia, uso e ocupação do solo, quantidade de estações

climáticas disponíveis, dados geográficos, além da necessidade de visita a campo a fim de constatar a veracidade de dados representados em mapas.

O refinamento da calibração é um processo lento e trabalhoso e que vem sendo estudado de forma exclusiva em diversos trabalhos técnicos-científicos, onde se busca entender a dinâmica das superestimativas de vazões pelo SWAT. Uma vez que o objetivo deste trabalho consiste em estudar comparativamente as vazões mínimas de referência obtidas através da curva de permanência com vazões diárias obtidas no SWAT, não se prendeu aqui no refinamento da calibração e sim nos resultados disponíveis para uso.

Ora, isso remete em avaliar a busca de outras alternativas para determinação de vazões mínimas de referência, fomentando o estudo nesse campo da ciência e buscando entender outras formas de avaliação hidrológica em bacias de pequeno porte, onde dados fluviométricos são escassos.

5.1.3. Vazões estimadas pelo SWAT

No processo de modelagem a bacia do Rio Timbuí foi dividida em 245 sub-bacias que resultaram em 6.960 unidades de respostas hidrológicas (HRU's). Essas unidades, bem como explanado outrora, correspondem a combinação única entre a pedologia, uso do solo e declividade, assim, gerando uma resposta hidrológica específica que busca se assemelhar com os eventos naturais.

Na Figura 11 a seguir é possível observar a distribuição espacial da bacia bem como a posição das sub-bacias 115 e 207.

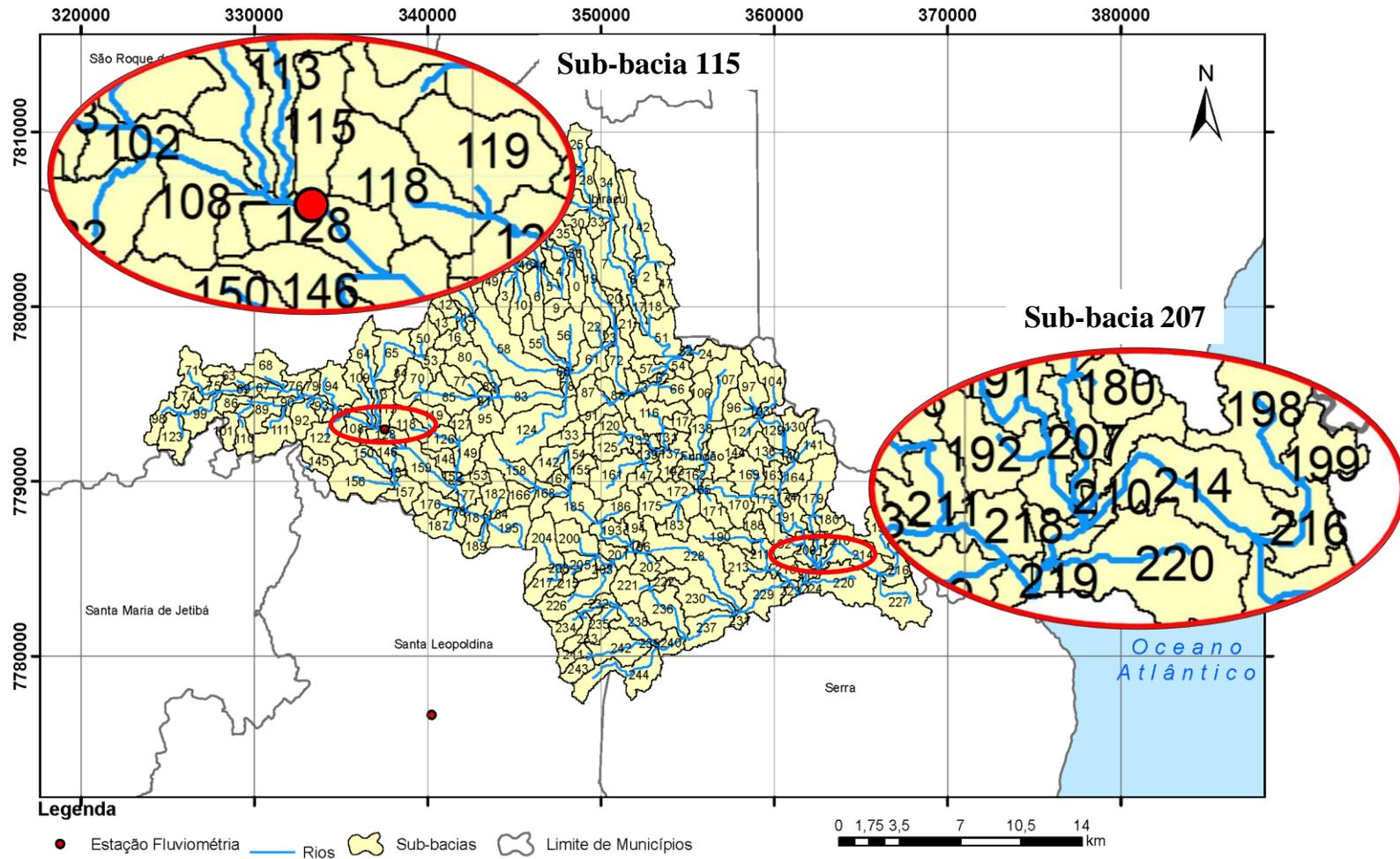


Figura 11 - Mapa das sub-bacias oriunda do SWAT – Sub-bacias 115 e 207

Fonte: Autoria Própria

5.1.3.1. Sub-Bacia 115

A Figura 12 a seguir ilustra as vazões estimadas pelo SWAT após a calibração para a sub-bacia 115 (bacia detentora da estação fluviométrica de Valsugana Velha-Montante), as vazões monitoradas no posto fluviométrico e as precipitações monitoradas da estação pluviométrica de Santa Teresa (INMET).

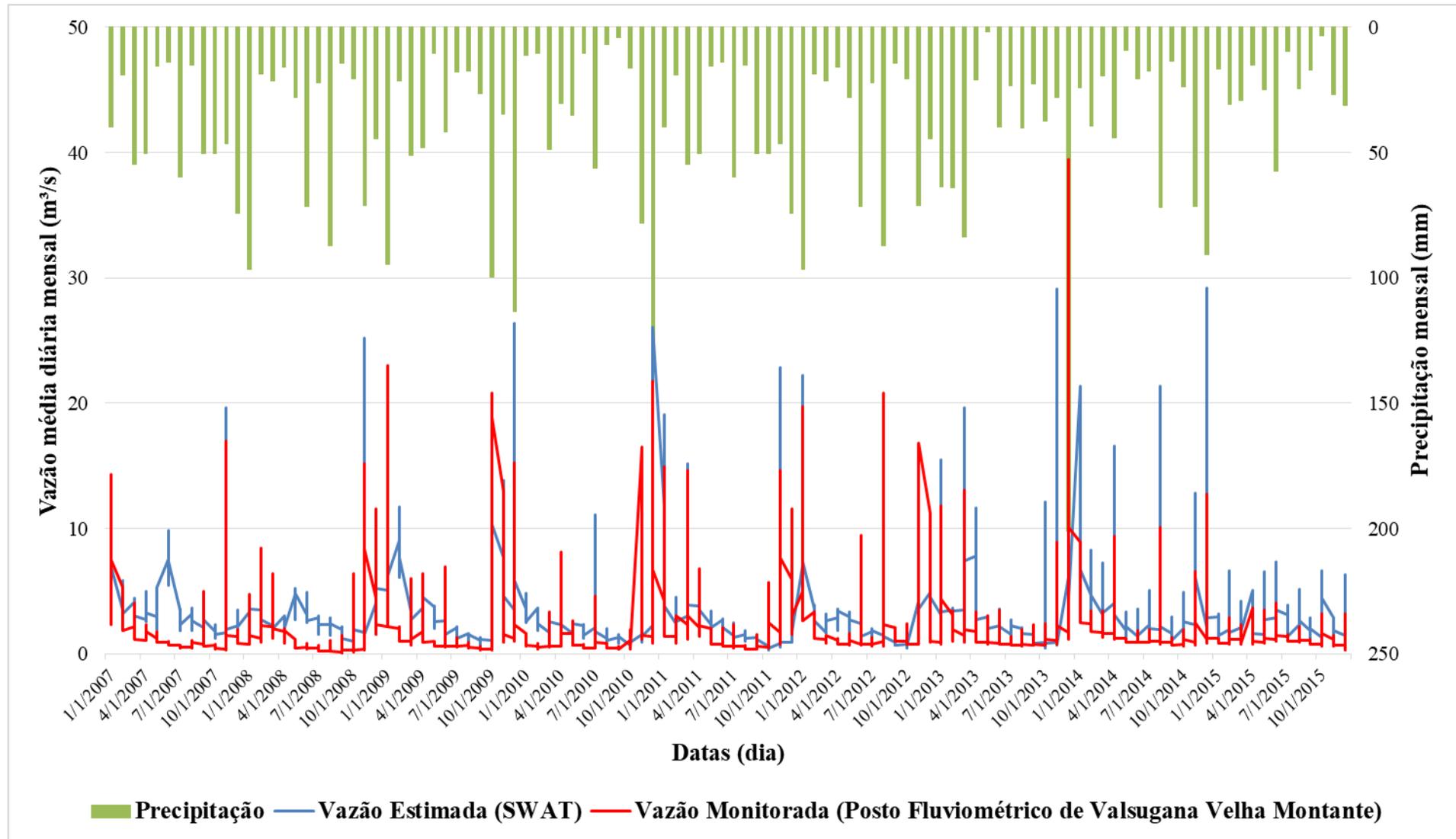


Figura 12 – Hietograma e série de dados de vazão média diária estimada e monitorada para a sub-bacia 115

Fonte: Autoria Própria

Com isso, observa-se que os valores de vazões em função das chuvas ocorridas estão intimamente ligados, como naturalmente é esperado. Exemplo disso é o evento extremo de precipitação em dezembro de 2013 em que o valor de chuva acumulada no dia 21 de dezembro atingiu a marca de 201 mm e, em contrapartida, o valor da vazão medida naquele mês foi de 39,42 m³/s, o maior de toda série histórica analisada.

Percebe-se ainda que os valores de vazão obtidos pelo SWAT, em determinados segmentos, se distanciam daqueles obtidos por meio de monitoramento. Diversos fatores podem influenciar isso, bem como àqueles referentes a calibração dos parâmetros mais sensíveis, explanados em capítulo específico.

Todavia, neste estudo, concentrou-se na análise dos dados com a calibração mais próxima ao aceitável como satisfatório (COE = 0,17). Adiante, comentar-se-á sobre os resultados e possíveis influência do uso do modelo não-calibrado.

Vale salientar que a estimativa de vazões pelo modelo SWAT leva em consideração, além dos dados pluviométricos, outras características climáticas e fisiográficas, como a pedologia e uso e ocupação do solo da bacia. Essas características afetam o processo de modelagem e, conseqüentemente, interferem na produção de água.

O SWAT é altamente sensível a uma gama de variáveis de entrada relacionadas a cobertura vegetal, uso e ocupação dos solos e clima (ADRIOLO et al., 2008; JHA, 2009; REUNGSANG et al., 2009; JEONG et al., 2010). O estudo de análise de sensibilidade apontou que o parâmetro mais sensível no modelo para a simulação escolhida foi o GW-DELAY que está diretamente ligado ao controle do tempo de recarga do aquífero raso.

Sob o estudo da bacia do Rio Timbuí é possível observar que aproximadamente 82% do solo da bacia é constituído de Latossolo vermelho amarelo distrófico A moderado de textura argilosa, como ilustrado na Figura 5 e descrito na Tabela 14. Quando mais restrito, tomando como exutório o posto fluviométrico de Valsugana Velha-Montante, observa-se que esse tipo de solo é predominante formada de solo do tipo Cd1 e outra mais central, próxima à estação, formada por AMd2.

Os Latossolos vermelhos amarelos distrófico são solos profundos ou muito profundos, bem drenados, com textura argilosa e de constituição mais oxídica, possuem baixa densidade aparente (0,86 a 1,21 g/cm³) e porosidade total alta a muito alta (56 a 68%). Com textura média, possuem densidade aparente pouco maior e porosidade total média (BALDISSERA, 2005). Possuem três horizontes que podem alcançar mais de 7 metros de profundidade e segundo a classificação pedológica nos grupos hidrológicos (TUCCI, 2014), pertencem ao grupo “A” que

apresenta características de alto teor de areia e baixo de argila o que facilita a infiltração às camadas inferiores e diminui o escoamento superficial até os cursos d'água da bacia.

O horizonte A desse tipo de solo apresenta textura arenosa com espessura média de 0,25 metros e condutividade hidráulica entre 250 e 500 mm/h, seguido de aproximadamente 7 metros de material com características argilosas distribuído entre os horizontes B e C, com condutividade hidráulica menor que 2,50 mm/h.

Entretanto, para Gonçalves e Libardi (2013), condutividade hidráulica na condição saturada do solo está mais ligada ao tipo de estrutura do que a textura, uma vez que ao elevar o grau de intemperismos, porcentagem de argila e matéria orgânica de um solo o valor dessa variável aumenta.

Quanto a declividade a maior parte da bacia apresenta valores superiores a 30%, enquanto as áreas com declividades inferiores a esse número, em pequena proporção, se concentram nos canais de cursos d'água e talvegues da bacia. Por outro lado, ao analisar toda a bacia do Rio Timbuí, verifica-se que há uma porção litorânea com áreas inferiores a 10% de declividade.

Isso pode explicar os valores altos de vazões medidos na sub-bacia 115, ainda que com pequena área de contribuição, apresentam um tempo de concentração reduzido, transformando boa parte da chuva em escoamento superficial.

O uso e ocupação do solo também influencia na produção de água da bacia. No presente caso, a sub-bacia é, em sua maioria, ocupada por mata nativa com áreas pulverizadas de cultivos agrícolas (banana e café), áreas edificadas, afloramentos rochosos e outros.

Sob essa ótica o SWAT utiliza dos valores de CN como parâmetro para representar a influência do uso e ocupação do solo na modelagem. Os valores de CN objetivam retratar numericamente a capacidade de infiltração em função do tipo e uso do solo e das condições de umidade de uma área. Todavia, as conclusões de autores como Castro (2013), Colombo et al. (2016) e Blainski; Costa; Nogueira (2017), convergem à recorrência de superestimava dos valores de vazão quanto utilizados os valores de CN pelo método SCS. Obviamente que outros fatores também são sensíveis e correlacionados a essa superestimava, como é o caso de Brighenti; Bonumá; Chape (2015) que, afirma que para o estudo o SWAT mostrou-se representativo quando o objetivo é a simulação de cenários em clima úmido, porém com grandes discrepâncias entre os dados monitorados quando o intuito é a simulação em cenários mais secos.

Outro aspecto que pode ser analisado com as vazões estimadas pelo SWAT é a sua relação com àquelas monitoradas. Para isso utilizou-se de um gráfico de correlação onde se inferiu os valores das vazões médias diárias estimadas pelo SWAT no eixo das ordenadas e as vazões médias diárias monitoradas para o posto de Valsugana Velha-Montante no eixo das abcissas.

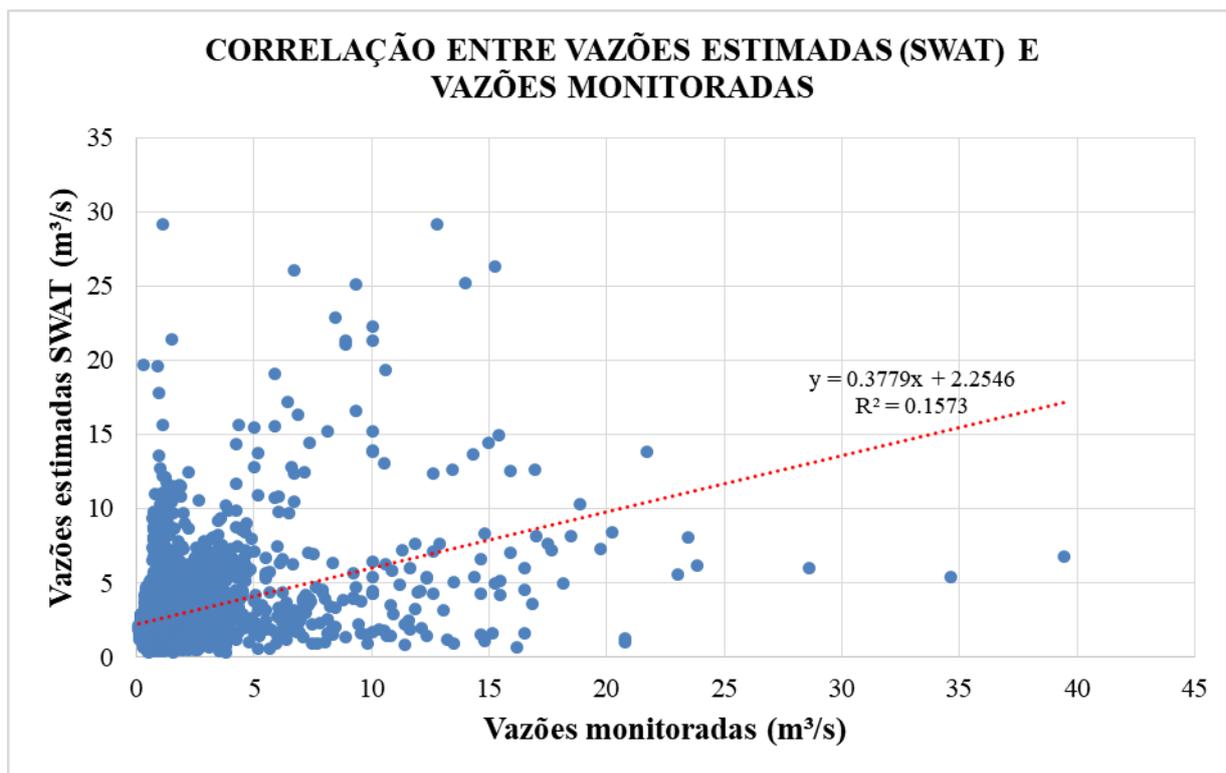


Figura 13 - Correlação entre vazões estimadas (SWAT) e vazões monitoradas
Fonte: Autoria Própria

Essa relação revela a não-convergência de dados quando utilizado o modelo SWAT para a estimativa de vazões. Percebe-se que as impressões dos pontos que correlacionam as vazões não seguem um desenvolvimento linear o que gerou em um valor de R^2 igual a 0,1573. Tomando como referência, Pereira (2012) afirma que esse coeficiente representa a proporção com que o modelo proposto consegue explicar a variabilidade da função hidrológica, onde que quanto mais próximo de 1 maior a parcela explicada pelo modelo. Logo, o resultado encontrado para este estudo denota a falta de similaridade entre os valores simulados e monitorados.

Diversos autores utilizaram dessa análise gráfica para criticar seus estudos. Moreira (2017) ao utilizar a correlação para seus estudos verificou os coeficientes R^2 só atingiram valores satisfatório, ou seja, próximos a 1, quando passados por um processo refinado de calibração do modelo SWAT. Isso pode explicar porque do distanciamento de correlação entre os valores modelados e monitorados apresentados neste trabalho, visto que a proposta fora de avaliar a capacidade do SWAT com os dados não monitorados na bacia hidrográfica sem apego ao refinamento até atingir valores regulares para enquadramento satisfatório do modelo.

Neitsch et al. (2011) afirmam que as condições de isolamento de amostras dificilmente serão reproduzidas por modelos que trabalham com longos período, como é o caso do SWAT. Isso infere que a provável causa da não convergência dos valores apresentados na Figura 12 possa

ser devido ao grande número de falhas na série dos dados monitorados, bem como o curto período de simulação.

5.1.3.2. Sub-Bacia 207

As vazões estimadas para a sub-bacia 207 são apresentadas no gráfico a seguir.

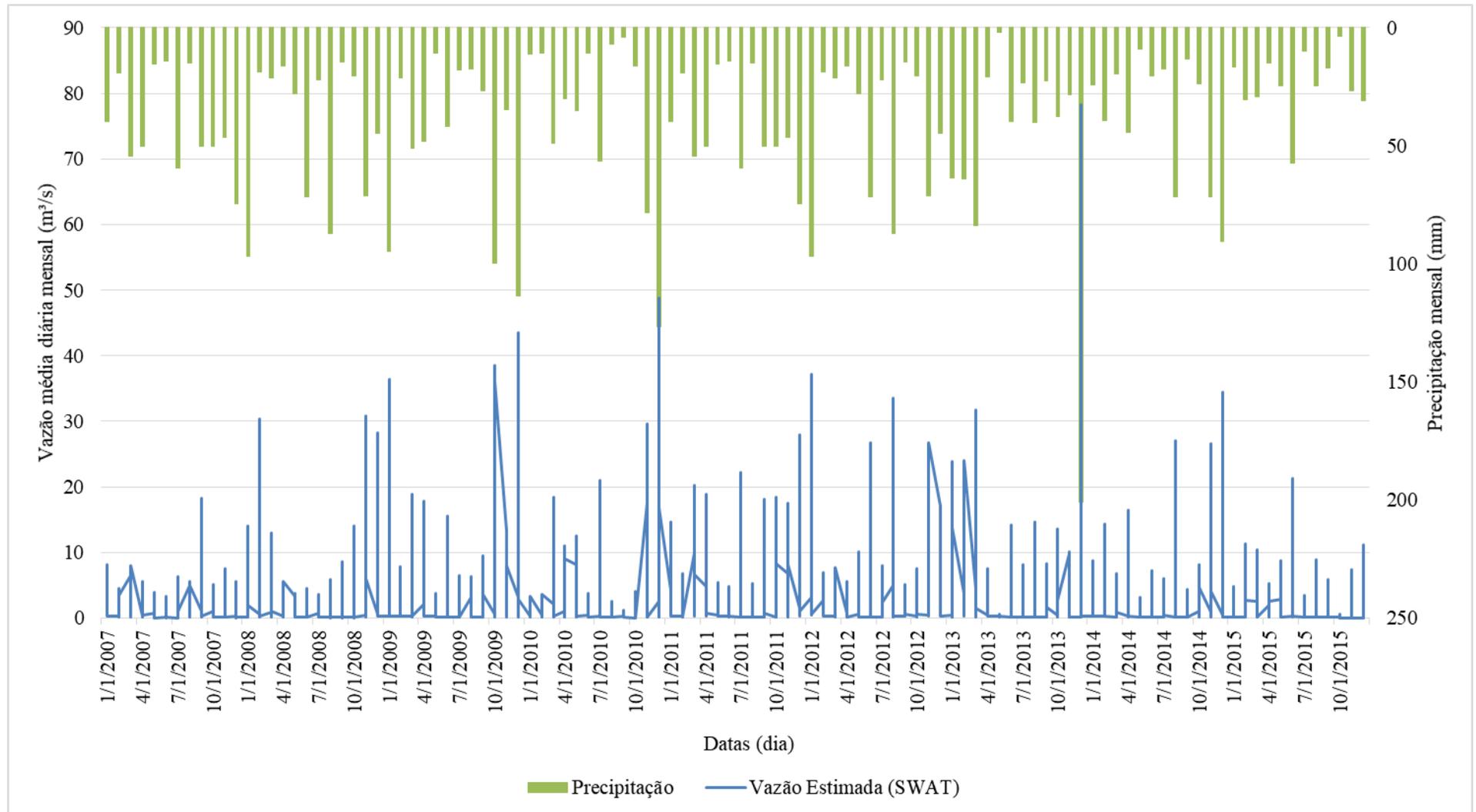


Figura 14 - Hietograma e série de dados de vazão média diária estimada e monitorada para a sub-bacia 207

Fonte: Autoria Própria

Percebe-se que proporcionalmente as vazões da sub-bacia 207 seguem a semelhança da sub-bacia 115, quando observados seus picos e seu desenvolvimento ao longo das datas. Todavia, comum a maior parte das modelagens no SWAT, é percebida uma superestimativa na produção de água na bacia.

Quando voltado à precipitação, é possível notar que há uma interatividade da reposta de vazão em função da intensidade de chuva. Isso pode ser percebido ao se observar os picos de chuva/vazão no fim do ano de 2013, sendo este o maior da série, com 201 mm de precipitação e 35,56 m³/s de vazão.

Obviamente que essa correlação entre precipitação e vazão diária está intimamente ligada ao tempo de concentração na bacia, que será discutido no item 5.3, onde demonstrar-se-á os resultados da terceira etapa deste trabalho.

Todavia, diferentemente da sub-bacia 115, a sub-bacia 207 não apresenta parâmetro de comparação de vazão, motivo pelo qual se fez proposto a avaliação de sua aderência com outros modelos de obtenção de vazões mínimas de referência. Nos itens que seguem discutir-se-á os resultados oriundos dessa modelagem quando aplicadas as técnicas de obtenção de Q₉₀.

5.2. RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA: DETERMINAÇÃO DAS VAZÕES MÍNIMAS DE REFERÊNCIA (Q₉₀) COM DADOS MODELADOS PELO SWAT

Para a determinação da vazão mínima de referência Q₉₀ foram utilizados os dados oriundos da modelagem do SWAT para os 3.285 dias de simulação (de 01/01/2007) a (31/12/2015). Essa quantidade de dias pode ser entendida como o total de dados (igual a “N”) segundo a metodologia proposta por Von Sperling (2014).

Para um valor de “N” igual a 3.285 classificou-se os dados de vazão em ordem decrescente, onde o maior valor de vazão calculado (29,17 m³/s para sub-bacia 115 e 78,29 m³/s para sub-bacia 207) assumiu o a posição m=1, o posterior a ele a posição m=2 e assim sucessivamente até a posição m=N=3.285 (valor de vazão mínima igual a 0,320 m³/s para sub-bacia 115 e 0,028 m³/s para sub-bacia 207).

A posteriori, obteve-se a probabilidade de um evento ocorrer superior a cada par (m, Q_m).

Com isso, as curvas de permanência foram traçadas para as duas sub-bacias e são apresentadas a seguir:

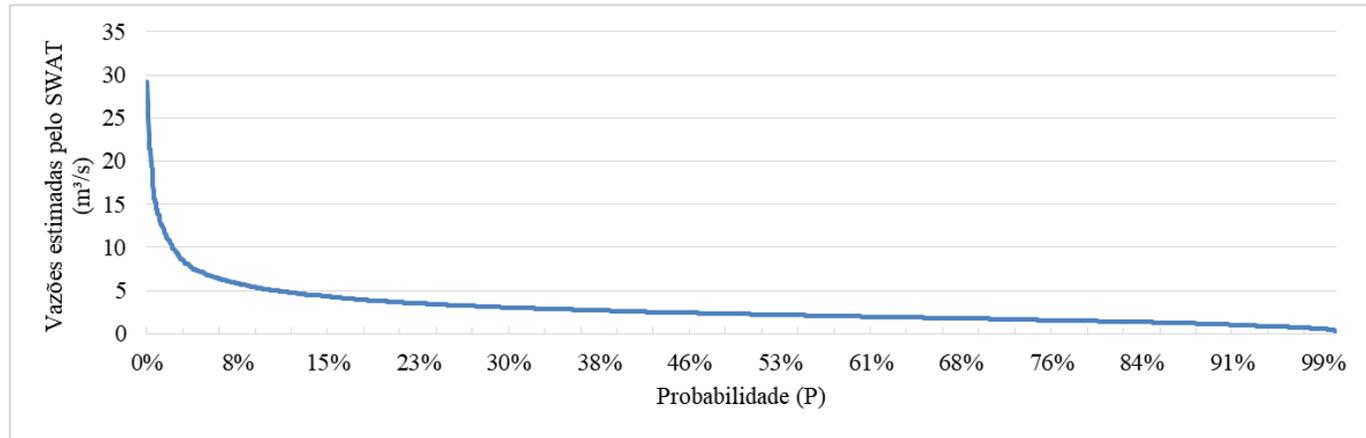


Figura 15 - Curva de Permanência para sub-bacia 115
Fonte: Autoria Própria

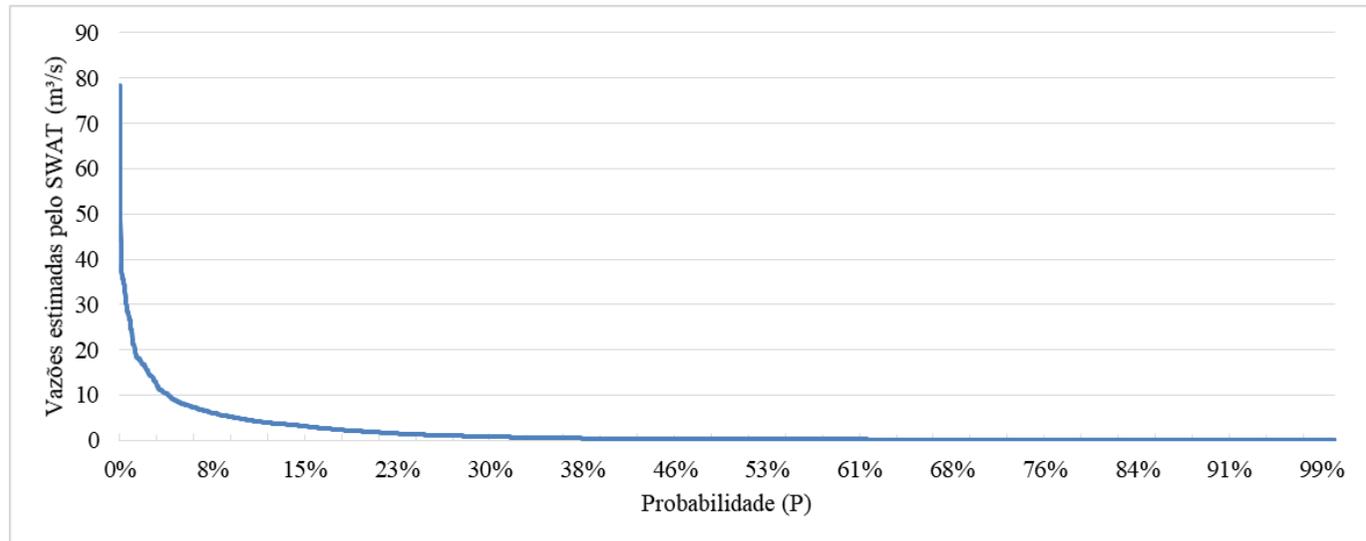


Figura 16 - Curva de Permanência para sub-bacia 207
Fonte: Autoria Própria

Ao cruzar a informação de 90% da probabilidade obtém-se um valor de Q_{90} igual a 1,110 m³/s para sub-bacia 115 e 0,112 m³/s para sub-bacia 207.

Nota-se que esses resultados são àqueles oferecidos como dados de saída de vazão do SWAT, onde na sub-bacia 115 é possível realizar uma análise comparativa com a série histórica monitorada, através do posto de Valsugana Velha-Montante, mas na sub-bacia 207 os valores são apenas aqueles simulados e sem nenhum parâmetro comparativo.

Todavia, há de se atentar para o valor de vazão maior na sub-bacia 115 quando comparado com a obtida na 207, o que não é comum já que esta encontra-se a jusante daquela.

Quanto a esse ponto, é importante se atentar que em pequenas bacias o efeito do tempo de concentração interfere diretamente na produção de água superficial nas calhas dos rios, ou seja, é possível que em um ponto a jusante apresente valores menores de vazão quando comparados a outros a montante, ainda que haja uma área de contribuição maior. Parte indispensável para essa análise é o estudo dos tempos de concentração da água na bacia que se pretende estudar.

Nesse contexto, uma fórmula largamente utilizada para o cálculo do tempo de concentração em pequenas bacias é aquela nomeada de Kirpich, desenvolvida em 1940 e elaborada com base em estudos de aplicação do método racional para o estado norte-americano do Tennessee.

No Tennessee, Kirpich fez estudos em seis pequenas bacias em áreas agrícolas próximas a cidade de Jackson. Essa região encontrava-se coberta de árvores em aproximadamente 56% de sua área, as bacias apresentavam área de contribuição girando em torno de 0,5 ha à 45 ha com declividades moderadas e apresentavam solos bem drenados (WANIELISTA; KERSTEN; EAGLIN, 1997).

Os resultados dessa aplicação se consagrou em uma fórmula que relaciona comprimento e declividade do talvegue principal da bacia.

No SWAT, conforme demonstrado no item 3.4.2.3, o tempo de concentração também está relacionado a declividade, porém, desta vez, na rampa da própria área da bacia e a velocidade do escoamento superficial

Independentemente do modelo, essas duas metodologias de se estimar o tempo de concentração denotam a influência direta da declividade da bacia (ou do talvegue principal) na produção de água. Logo, quando se tem uma declividade mais suave a tendência é que o tempo de concentração da água na bacia seja maior, o que favorece a infiltração tanto no aquífero raso quanto no profundo. Essa atribuição é corroborada ao se observar, segundo os resultados da análise de sensibilidade, que o parâmetro mais sensível do modelo para a bacia em estudo foi o GW_DELAY, intimamente ligado a capacidade de infiltração do solo por meio da recarga do aquífero raso.

Mais adiante, no item 5.4, discutir-se-á sobre esses resultados à luz da comparação quantitativa. Enquanto isso faz-se necessário obter, a partir de equações de regionalização de vazões mínimas de referência consagradas pela literatura, as vazões estimadas para essas mesmas bacias, cumprindo-se o segundo objetivo do trabalho, razão pela qual se ponderará a qualidade dessa informação quando vista na perspectiva da outra, ou seja, pelo modelo SWAT.

5.3. RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA: DETERMINAÇÃO DAS VAZÕES MÍNIMAS DE REFERÊNCIA (Q_{90}) ATRAVÉS DE EQUAÇÕES DE REGIONALIZAÇÃO.

Para a aplicação da equação de Q_{90} proposta por Ferreira (2010) foi necessário conhecer o comprimento do rio principal e a declividade da bacia até o local pretendido. Tanto os dados quanto o resultado dessa aplicação para cada sub-bacia em estudo encontram-se na Tabela 22 a seguir:

Tabela 22 - Resultado da vazão Q_{90} para equação de Ferreira (2010)

Sub-bacia	Comprimento do rio principal (km)	Declividade média da bacia (%)	Q_{90} (m³/s)
115	18,12	45,1%	0,452
207	45,27	38,6%	0,217

Fonte: Autoria própria

Da mesma forma da obtenção de Q_{90} através da modelagem pelo SWAT, percebe-se que a vazão encontrada para a sub-bacia 207 é aproximadamente duas vezes menor do que a da sub-bacia 115, ainda que esta esteja situada a montante daquela. Como a área de contribuição está diretamente ligada a produção de água esperava-se que o valor fosse significativamente maior na sub-bacia a jusante.

Uma das explicações pode ser pelo fato que a equação proposta pela autora referenciada se limita a uma declividade mínima de 49,99% e na bacia em estudo são encontradas fortes alterações nas declividades, principalmente quando se avança para a foz onde são encontradas declividades inferiores a 25%. Com isso a declividade média tende a ser menor na porção leste da bacia.

Com isso, pode-se afirmar que a equação proposta não é recomendada para toda a bacia, se restringindo apenas para regiões com altas declividade médias, o que é realidade apenas na porção oeste da mesma.

Por outro lado, outra explicação pode ser referente a ação do tempo de concentração e capacidade de infiltração no solo encontra-se diretamente ligada ao processo, que pode

justificar essa diminuição de vazão em bacias a jusante, conforme foi exposto no item 5.2 para modelagem pelo SWAT.

Para a equação apresentada por Euclides et al. (2007) foi necessário o conhecimento da área de drenagem e precipitação média anual da bacia no ponto pretendido de estudo. Nesse caso os dados e o resultado da vazão Q_{90} para cada sub-bacia é apresentado a seguir, na Tabela 23:

Tabela 23 - Resultado da vazão Q_{90} para equação de Euclides et al. (2007)

Sub-bacia	Área de drenagem (km ²)	Precipitação média anual (mm)	Q_{90} (m ³ /s)
115	88,95	1.313,80	0,549
207	104,79	1.313,80	0,554

Fonte: Autoria própria

Como a variável área é a única a se alterar entre as bacias analisada e está diretamente ligada à vazão, segundo a equação, é notório que o valor de Q_{90} é maior para a sub-bacia 207, diferentemente do ocorrido na aplicação da equação proposta por Ferreira (2010) e na modelagem pelo SWAT.

A simplicidade da equação proposta traz facilidade na aplicação em qualquer ponto da bacia, todavia, atrelado a isso, há possíveis erros quando não são considerados outros fatores inerentes a produção de água na calha principal. Principalmente quando não há dados registrados próximas ao ponto que se pretende estudar.

Outro ponto a ser analisado é que não há variação da precipitação média anual, visto que por inexistirem estações pluviométricas na região da sub-bacia 207 que pudesse se refinar a metodologia do polígono de Thiessen, adotou-se a mesma que utilizada para a sub-bacia 115.

5.4. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

A fim de se discorrer sobre os resultados expostos anteriormente apresenta-se a seguir de forma de tabela os valores de Q_{90} para cada método utilizado e sub-bacia em estudo. Salienta-se que para efeito comparativo com esses três métodos utilizou-se do valor de Q_{90} aferido pelo IEMA (2007) com os dados históricos da estação de Valsugana Velha-Montante, nomeado como monitorada na Tabela 24.

Tabela 24 – Comparativos das vazões Q_{90}

Sub-bacia	Q_{90} (m ³ /s)		Q_{90} (m ³ /s)		Q_{90} (m ³ /s)		
	Monitorada	Ferreira (2010)	ER (%)	Euclides et al. (2007)	ER (%)	SWAT	ER (%)
115	0,499	0,452	9,483	0,549	-10,102	1,110	-122,44
207	-	0,217	-	0,554	-	0,112	-

Fonte: Autoria própria

Para a sub-bacia 115 observa-se que o erro relativo (ER) é de 9,483% quando aplicada a equação de Ferreira (2010) e em muito se assemelha com aquela monitorada, ou seja, conclui-se que sua aplicação tende a ser satisfatória para a bacia em estudo. Um pouco maior é o erro relativo para a equação de Euclides et al. (2007), quando seu resultado é de 10,11% negativo, o que retrata uma superestimava da vazão estimada em detrimento a monitorada.

Diversos autores que utilizaram o erro relativo na aplicação de vazões mínimas de referência. Dentre eles pode-se citar o estudo de Ribeiro et al. (2005) que constataram que a regionalização pelo método tradicional (ELETROBRÁS, 1985) apresentou melhores resultados em detrimento as outras, com erro relativo de 16,56%.

Por outro lado, à luz da vazão modelada pelo SWAT observa-se que o erro ultrapassa os 100% negativo, o que indica a total falta de convergência com valores superestimados de vazão. Isso pode ser explicado pelo fato de que os dados do SWAT foram utilizados sem a calibração ideal, onde os valores obtidos são refinados até que estejam estatisticamente aceitáveis face aos monitorados. Reitera-se neste ponto que esse processo em específico não foi o foco deste trabalho, visto que a hipótese levantada ao início era que o modelo SWAT poderia ser uma ferramenta auxiliadora na determinação mais precisa e rápida na determinação de vazões mínimas de referência facilitando, assim, órgãos reguladores e solicitantes de outorgas quando envolvidos no processo ambiental.

Já ao se analisar a sub-bacia 207 percebe-se que para o método de Ferreira (2010) o valor de vazão decresce em relação ao da bacia 115, ainda que tenha uma área de contribuição maior, como exposto outrora. Sendo assim, pode-se afirmar que a equação proposta pela autora não se aplica para as bacias mais próximas da foz, uma vez que ali a declividade média tende a diminuir e, por ser diretamente proporcional a Q_{90} , diminui o valor de vazão.

Quanto a essa divergência de valores pode-se citar estudos que com a aplicação das técnicas de regionalização não obtiveram dados satisfatórios quando aplicados em outros pontos da bacia. Exemplo disso é produção de Sugai, Fill e Gomes (1998) que observaram diferenças de até

100% entre os valores de Q_{95} medidos em estações fluviométricas e os obtidos através das equações, para a bacia dos rios Ivaí e Piquiri, estado do Paraná.

É importante ressaltar que a utilização das técnicas de regionalização nem sempre traz resultados satisfatórios. Sugai, Fill e Gomes (1998), por exemplo, observaram diferenças de até 100% entre os valores de Q_{95} medidos em estações fluviométricas localizadas ao longo dos rios Ivaí e Piquiri (Estado do Paraná) e os respectivos valores regionalizados. Os autores ainda defendem a necessidade de investimentos pesados na ampliação e operação da rede de estações fluviométricas, bem como na pesquisa e desenvolvimento tecnológico de melhores modelos de regionalização para vazões de estiagem, a fim de que o sistema de outorga e cobrança dos direitos do uso da água possa funcionar adequadamente.

Para essa mesma bacia, ao se voltar ao valor de vazão obtida através da equação de Euclides et al. (2007), é possível notar que a mesma é ligeiramente superior à da sub-bacia 115. Considerando que todas as variáveis utilizadas na equação estão dentro dos intervalos recomendados e que o erro relativo foi aceitável para uma sub-bacia a montante (115) é possível supor que os resultados podem ser satisfatórios.

De forma geral é importante salientar que o método de Regionalização Tradicional, utilizado para a confecção das equações dos dois trabalhos referenciados, é recomendado à médias e grandes bacias, em condições de existência de informações hidrológicas disponíveis que permitam a transferência para as seções sem dados (POGIAN, 2016). Ou seja, o método não é indicado para o uso em bacias de pequeno porte, como é o caso deste trabalho.

Em suma, pode-se observar que as equações de regionalização, tanto de Ferreira (2010) e Euclides et al. (2007) para a sub-bacia 115 forneceram valores próximos ao utilizado pelo IEMA e obtido através das medições da estação fluviométrica de Valsugana Velha-Montante. Diferentemente disso, o modelo SWAT apresentou valor de Q_{90} superestimado, ultrapassando o dobro do valor utilizado pelo IEMA. Já para a sub-bacia 207 não percebeu-se similaridade entre as vazões obtidas pelo método das equações e do modelo SWAT.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Através deste estudo foi possível obter-se as seguintes conclusões:

- As vazões mínimas de referência (Q_{90}) obtidas através da curva de permanência com os dados oriundos da modelagem com o SWAT apresentaram valores superestimados quando comparados com àquelas obtidas através dos dados monitorados;
- Comparativamente os valores da vazão mínima de referência (Q_{90}) para as duas sub-bacias estudadas (115 e 207) apresentam valores superiores àqueles obtidos através das equações de regionalização propostas por Euclides et al. (2007) e Ferreira (2010);
- Ao se comparar a vazão Q_{90} monitorada aferida pelo IEMA percebeu-se que o valor de Q_{90} , quando utilizada a equação de Ferreira (2010), apresentou um erro relativo positivo, ou seja, há uma subestimativa da vazão. Já para a equação proposta por Euclides et al. (2007), o erro relativo apresentou-se de forma negativa, indicando uma superestimativa;
- A modelagem da bacia do Rio Timbuí com o uso do SWAT apresentou valores de vazões diárias superestimadas quando comparados aos monitorados na estação fluviométrica de Valsugana Velha-Montante, mesmo após um processo de tentativas de calibração. Isso pode estar relacionado com diversos fatores, tais como o fato de o período de modelagem ser muito curto, o que provoca pouca liberdade de simulações; o modelo ter sido desenvolvido para um banco de dados norte-americanos, o que quando aplicado para território brasileiro, há suposições e equivalência de dados, que pode resultar em limitações na confiabilidade; as modificações temporais do uso e ocupação do solo, visto que a base de dados para tal é datada de 2007;
- O processo de calibração do modelo, para a bacia do Rio Timbuí, apresentou divergência a cada tentativa para os valores mínimos de desempenho do modelo (para o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe), o que faz com que os valores de vazões diárias não reflitam com exatidão a realidade à luz dos valores monitorados.
- O processo de análise de sensibilidade do modelo demonstrou que o parâmetro mais sensível do modelo é o GW_DELAY que tem influência direta sobre o tempo de recarga do aquífero raso;

- Poucos estudos voltados à análise conjugada do uso do SWAT para a determinação de vazões mínimas de referência (Q_{90}), principalmente para a bacia do Rio Timbuí, impossibilitaram uma análise mais aprofundada dos possíveis comportamento do modelo na região.

Quanto as recomendações à estudos subsequentes pontua-se:

- É necessário o uso variáveis climáticas, fisiográficas e fluviométricas com maior grau de confiabilidade e com uma maior amplitude de tempo histórico, a fim de se minimizar as possíveis dificuldades de calibração;
- De forma a se validar o modelo SWAT e as equações de regionalização para a sub-bacia 207 seriam necessárias medições de vazões em campo, dessa forma possibilitando um comparativo entre valores;
- Implantação de estações fluviométricas ao longo do Rio Timbuí, principalmente quando este se aproxima da foz com um monitoramento contínuo a fim de se formar uma série histórica para subsidiar estudos futuros;
- Implantação de estações de monitoramento climático na porção mais próxima da foz da bacia, principalmente com coleta dos dados de: temperaturas máximas e mínimas do ar, umidade relativa do a, radiação solar, velocidade do vento e precipitação;
- Para uma melhor representação do MDE seria necessária uma base de informações topográficas mais consistentes, com resoluções melhores do que as obtidas pelo ASTER, atualmente disponíveis com resolução de 30 metros.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ADRIOLO, M.V.; SANTOS, I.; GIBERTONI, R.C. & CAMARGO, A.S.G. **Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, Anais. Belo Horizonte, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2014**. Ed. Especial. Brasília: ANA, 2015. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informes2014.pdf>>. Acesso em: 06 de novembro de 2018.

ALMEIDA, M. M., **Regionalização de Vazões Médias de Longo Período e de Volumes de Reservatórios de Regularização**. 209 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2010.

AMORIM, E. L. C.; OLIVEIRA NETTO, A. P.; MENDIONDO, E. M. **Estudo de métodos para regionalização de vazão**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, 2005.

ANDRADE, E. M.; HAWKINS, R. H. **Aplicação da Função de Andrews na avaliação da regionalização de bacias em regiões áridas e semi-áridas**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 5, n.4, p. 17-24, 2000.

ARNOLD, J. G., ENGEL, B. A., SRINIVASAN. **Continuous-time, grid cell watershed model**. Proc. of the 18-19 June 1993 Conf. Spokane, Washington, 267-278, 1993.

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

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**. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2012.

ARROIO JUNIOR, P. P.; **Avaliação da produção e transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Itaqueri, municípios de Itirapina e Brotas – SP**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, 2013.

BAENA, L. G. N., SILVA D. D., PRUSKI, F. F., CALIJURI, M. L.; **Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul**. Revista Engenharia na Agricultura, Jaboticabal, v. 24, n.3, p. 612-624, 2004.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT**. 148p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá/MT, 2005.

BENAMAN, J.; SHOEMAKER, C. A.; HAITH, D. A. **Calibration and validation of soil and water assessment tool on an agricultural watershed in upstate New York**. Journal of Hydrologic Engineering. v. 10, n. 10, p. 363-374, 2005.

BESKOW, S.; NORTON, L. D.; MELLO, C. R. **Hydrological prediction in a tropical watershed dominated by Oxisols using a distributed hydrological model**. Water Resources Management, v.27, p.341-363, 2013.

BEVEN, K. J. **How far can we go in distributed hydrological modelling**. Hydrology and Earth System Sciences, v.5, n.112, 2001.

BOURAOUI, F., BENABDALLAH, S., JRAD, A.; BIDOGLIO, G.; **Application of the SWAT model on the Medjerda river basin (Tunisia)**. Physics and Chemistry of the Earth Journal, v.30, p. 497-507, 2005.

BLAINSKI, E. A., COSTA, E., NOGUEIRA, P. C. P. **Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense.** Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 2017.

BRASIL. Lei n. 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a **Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**, Brasília, DF, janeiro 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Acesso em: 15 de outubro de 2018.

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

CASTRO, K. B. **Avaliação do Modelo SWAT na Simulação da Vazão em Bacia Agrícola do Cerrado Intensamente Monitorada.** 141 p. – Dissertação (Mestrado em Geociências), Instituto de Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2013

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Drenagem urbana – Manual de projeto.** 3ª ed. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1986.

COLOMBO, T. C.; CORSEUIL, C. W.; BACK, A. J.; MAMEDIO, F. M. P.; SEHNEM, M.; BELLETTINI, A. **Estimativa de vazão de uma Bacia Hidrográfica do Sul de Santa Catarina com modelagem distribuída.** Anais V Simpósio de Integração Tecnológica do Sul Catarinense, Araranguá, 2016.

COSER, M. C. **Regionalização de Vazões $Q_{7,10}$ no Estado do Espírito Santo.** 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2003.

CRUZ, J. C. **Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais.** 199 p.; Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

DASSIE, M. **Estudo demonstrativo da aplicação de modelos chuva-vazão e de balanço hídrico na análise de captação de águas em lagoas naturais.** 179 p. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2001.

DIAS JUNIOR, M. S.; BERTONI, J. C.; BASTOS, A. R. R. **Curso de pós-graduação em solos e nutrição de plantas**. Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências do Solo - Setor de Física do Solo, Lavras, 2000.

DINIZ, L. S. **Regionalização de parâmetros de modelo chuva-vazão usando redes neurais**. 213 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

DINIZ, L.S.; CLARKE, R.T. **Regionalização de parâmetros de modelo chuva-vazão usando redes neurais**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - Aracaju, 2001.

ECKHARDT, K; FOHRER, N; FREDE. H-G. **Automatic model calibration**. Hydrological Processes, v. 19, p. 651–658, 2005.

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro, vol. 1; 1985.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para projetos de implantação de pequenas centrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro, RJ: ELETROBRAS, 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Espírito Santo**. 1978. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/335800/levantamento-de-reconhecimento-dos-solos-do-estado-do-espírito-santo>>. Acesso em: 06 novembro 2018.

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; FARIA FILHO, R. F.; SANTOS, A. P. **Regionalização hidrológica na região hidrográfica capixaba, compreendida entre os limites da bacia do rio Doce e do rio Itabapoana**. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste, Cuiabá-MT, 2007.

FERREIRA, G. L. **Regionalização de vazões de referência $Q_{7,10}$ e Q_{90}** . 181 p.; Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2010.

FILL, D. H. **Informações Hidrológicas**. In: Coleção ABRH. Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos. São Paulo: Nobel/ABRH, p. 95-102. 1987.

FRANCHINI, M.; SUPPO, M. **Regional Analysis of Flow Duration Curves for a Limestone Region**. Water Resources Management; v. 10; p. 199-218. 1996.

FUKUNAGA, D. C. **Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo usando o SWAT**. 98 p.; Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Espírito Santo. Alegre, 2012.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. **The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions**. American Society of Agricultural and Biological Engineers; v. 50(4). p. 1211-1250, 2007.

GITAU, M. W.; CHAUBEY, I. **Regionalization of SWAT Model Parameters for Use in Ungauged Watersheds**. Water. v 2, p. 849-871. 2010

GONÇALVES, A. D. M. de A.; LIBARDI, P. L. **Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, p.1174-1184, 2013.

GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S. and YAPO, P.O. **Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration**. Journal of Hydrologic Engineering, v. 4, p. 135-143, 1999

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional frequency analysis: an approach based on L-moments**. Cambridge: Cambridge University Press, 224 p, 1997.

IEMA - Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Relatório Técnico de Disponibilidade Hídrica – PERH/ES**. 2007

INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Programa de Assistência Técnica e Extensão Rural - Proater 2011-2013** (Santa Teresa). 2011.

JHA, M. **Hydrologic Simulations of the Maquoketa River Watershed Using SWAT**. Center for Agricultural and Rural Development (CARD). Ames, Iowa State University, 2009.

JEONG, J.; KANNAN, N.; ARNOLD, J.; GLICK, R.; GOSELINK, L. & SRINIVASAN, R. **Development and integration of sub-hourly rainfall-runoff modeling capability within a watershed model**. Water Resources Management, v. 24, p. 4505-4527, 2010.

MOREIRA, L. L.; **Análise de Sensibilidade de Parâmetros e de Desempenho do Modelo Soil And Water Assessment Tools (SWAT) na Estimativa de Vazões Médias em Bacias Hidrográficas**. 109p.; Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2017.

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**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 50, n. 3, p 885-900, 2007.

MOSLEY, M. P. **Delimitation of New Zealand hydrologic regions**. Journal of Hydrology, v. 49, p. 173-192, 1981.

MULETA, M. K.; NICKLOW, J. W. **Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model**. Journal of Hydrology, v.306, p.127-145, 2005.

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, 1970.

NATHAN, R. J.; McMAHON, T. A. **Identification of Homogeneous Regions for the Purposes of Regionalisation** – Journal of Hydrology, v. 121, p. 217-238, 1990.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R. & WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool: Theoretical documentation - version 2005**. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service; Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station, 494 p. 2005.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J.G; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R; KING, K.W. **Ferramentas de avaliação de solo & água. Documentação Teórica. Versão 2009**. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas-EUA, 2011.

OBREGON, E.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. **Regionalização de vazões com base em séries estendidas: bacias afluentes à lagoa Mirim, RS**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 4, n. 1, p. 57-75, 1999.

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003.

PAULO, R. G. F. **Ferramentas para a determinação de vazões ecológicas em trechos de vazão reduzida: destaque para aplicação do método do perímetro molhado no caso de Capim Branco I**. 114 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

PERALTA, A. S. **Análise de Regionalização de Vazão Máxima para Pequenas Bacias Hidrográficas**. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

PEREIRA, L. A. **Regionalização de vazões de permanência aplicada na Região Hidrográfica do Uruguai utilizando o Programa SisCoRV**. Trabalho de conclusão de curso de graduação em Engenharia Ambiental, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2012.

PEREIRA, J. S.; LANNA, A. E. L. **Análise de critério de outorga dos direitos de uso**. 1996. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Salvador, 1996.

POGIAN, M. F. **Estimativa de vazão mínima em pequenas bacias hidrográficas. 130 p.;** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2016.

PINTO, E. J. A.; NAGHETTINI, M. **Hidrologia Estatística.** 561 p. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

QUIMPO, R. G.; MCNALLY, T.A. **Regionalized flow duration for Philippines.** Journal of Water Resources Planning and Management, v. 109, n. 4, p. 320-330, 1983.

RAUDKIVI, A. J. **Hidrology.** Oxford : Ed., Pergamon Press, 471 p. 1979.

REIS, J. A. T.; CRISTO, J. N.; ELESBON, A. A. A.; MENDONÇA, A. S. F. **Regionalização de curvas de permanência de vazão para rios do estado do Espírito Santo.** Revista Capixaba de Ciência e Tecnologia. n. 1, p. 28-35, 2006.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental.** Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas. INPE, 65 p. 2000.

REUNGSANG, P.; KANWAR, R.S.; JHA, M.; GASSMAN, P.W.; AHMAD, K. & SALEH, A. **Calibration and validation of SWAT for the upper Maquoketa River Watershed.** Intern. J. Agric. Eng., 16:35-48, 2009.

RIBEIRO, C. B. M.; MARQUES, F. A.; SILVA, D. D. **Estimativa e Regionalização de Vazões Mínimas de Referência para a Bacia do Rio Doce.** Engenharia na Agricultura; Viçosa, MG, v. 13, n. 2, p. 103-117, 2005.

SALLES, Leandro de Almeida. **Calibração e validação do modelo Swat para a predição de vazões na Bacia do Ribeirão Pípiripau.** 114 p.; Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012

SANGREY, D. A., HARROP-WILLIAMS, K. O., KLAIBER, J. A. **Predicting ground-water response to precipitation.** ASCE J. Geotech. Eng. 110(7): 957-975, 1984.

SANT'ANA, R. F., FIOR, M.T.B., KAVISKI, E.; **Aproveitamento hidrelétrico de pequeno porte: regionalização de vazões de estiagem, de curvas de permanência e de vazões máximas de pequenas bacias hidrográficas do Estado do Paraná.** CEHPAR. Curitiba, v. I-IV, 1989.

SANTOS, I, ANDRIOLO, M.V., GIBERTONI, R.C., PEREIRA FILHO, D.L.B., KAVISKI, E., MÜLLER, I.I., ROHN, M.C., NISHIDA, E., SILVA, R.C. **Desenvolvimento de modelo de avaliação da qualidade de água e transporte de sedimentos para pequenas e médias centrais elétricas:** modelagem da erosão e transporte de sedimentos. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC). Curitiba – PR, 2005.

SANTOS, E. H. M.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. **Relação entre uso do solo e comportamento hidrológico na Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, n.8, p.826–834, 2010.

SCHMALZ, B., FOHRER, N. **Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model.** Advances in Geosciences, 21:91-98, 2009.

SEARCY, J. K. **Flow duration curves-manual of hydrology: Part 2.** Low flow techniques, 1963.

SELLAMI, H; LA JEUNESSE, I.; BENABDALLAH, S; BAGHDADI, N.; VANCLOOSTER, M. **Uncertainty analysis in model parameters regionalization: a case study involving the SWAT model in Mediterranean catchments (Southern France).** Hydrology Earth System Sciences. V 18, p. 2393–2413, 2014.

SIMMERS, I. **A systematic problem-oriented approach to hydrological data regionalisation.** Journal of Hydrology, v. 73, p. 71-87, 1984.

SILVA JÚNIOR, O. B., BUENO, E. O., TUCCI, C. E. M., CASTRO, N. M. R.; **Extrapolação espacial na regionalização da vazão.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 8, n. 1. P. 21-37, 2003.

SILVA, D. D.; MARQUES, F. A.; LEMOS, A. F. **Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para bacia do Rio São Francisco**. Revista Engenharia na Agricultura. Viçosa. v. 17, n.5, p. 392-403, 2009.

SILVEIRA, A L L. **Ciclo Hidrológico e a Bacia Hidrográfica**. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Editora Universitária / Edusp / ABRH, 1997.

SMAKHTIN, V. U.; **Low flow hydrology: a review**. Journal of Hydrology, v. 240, p. 147-186, 2001.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). **Soil mechanics level I**. Module 3 - USDA Textural Soil Classification. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 1987.

SOUSA, H. T. **Sistema computacional para a regionalização de vazões**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) 86p. Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, 2009.

SOUZA, R. M de. **Estimativa de vazões mínimas na Bacia do Altíssimo Rio Negro, Região Sul-Brasileira, com aplicação do modelo SWAT**. 122 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Curitiba, 2011.

SOUZA, W. V de. **Aplicações do Modelo SWAT no Brasil: Revisão e Estudo de Caso – Amazônia**. 40p. Trabalho Final de Curso (Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal De Juiz De Fora. Juiz De Fora, 2016.

SUGAI, M. R. V. B.; FILL, H. D.; GOMES, J. **A importância do Monitoramento da Gestão de Recursos Hídricos**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS, 1998, Gramado. Anais. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

TESH, F., **Avaliação da calibração do modelo Soil And Water Assessment Tool para a simulação de estradas não pavimentadas em bacias hidrográficas**. 122 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2015.

TUCCI, C. E. M. e BELTRAME, L. F. S. **Evaporação e Evapotranspiração**. In TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Editora Universidade/UFRGS. ABRH. Rio Grande do Sul, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia – Ciência e Aplicação**. 2 ed. Porto Alegre: Ed. Universidade; UFRGS; Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998a.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Editora da Universidade/UFRGS Porto Alegre – RS, 1998b.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS: ABRH, 2002.

TUCCI, C. E. M. Interceptação. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2014. p. 243-252.

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

VENETIS, C. **A study of the recession of unconfined aquifers**. Bulletin; International Association of Scientific Hydrology 14 (4):119-125, 1969.

VOGUEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. **Flow-duration curves. I: New interpretation and confidence intervals**. In: Journal of Water Resources Planning and Management, v. 120, n. 4, p. 485-504, 1994.

VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Vol. 7. 2ª edição. Editora Belo Horizonte. 592p, MG: Ed. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

WANIELISTA, M. P.; KERSTEN, R.; EAGLIN, R. **Hydrology: Water Quantity and Quality Control**. Wiley, New York, 1997.