

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA–CAMPUS ARARANGUÁ

TAMILIS COMIN COLOMBO

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE ENERGIA**

ARARANGUÁ

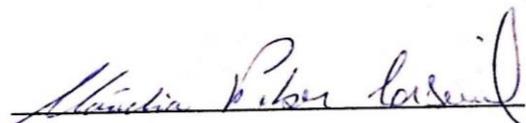
2016

TAMILIS COMIN COLOMBO

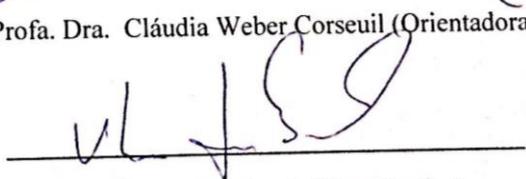
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA

Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Araranguá

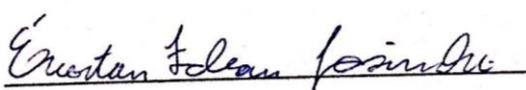
Aprovado em: 05/14/2016



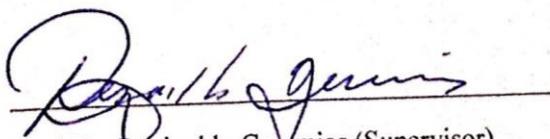
Prof. Dra. Cláudia Weber Corseuil (Orientadora)



Prof. Dr. Álvaro José Back (Examinador)



Prof. Dr. Éverton Fabian Jasinsk (Examinador)



Prof. Dr. Reginaldo Geremias (Supervisor)

TAMILIS COMIN COLOMBO

ANÁLISE DA VAZÃO MÍNIMA DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA COM MODELO SWAT PARA CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL HIDRELÉTRICO

Tamilis Comin Colombo*

RESUMO

A vazão mínima de um recurso hídrico é uma das variáveis fundamentais para o estudo do aproveitamento hidrelétrico de determinada região. No entanto, sua estimativa, para um longo período de tempo é uma tarefa de difícil execução, pois depende de inúmeros fatores e variáveis ambientais, relacionados à topografia, geologia, uso da terra, clima, solos, entre outros. Contudo, a medição dessas variáveis, muitas vezes, tem custo elevado, e nem sempre é possível abranger toda a área de interesse, que neste caso considera-se a bacia hidrográfica como unidade de análise. Modelos hidrológicos são ferramentas que possibilitam a representação do sistema real de uma bacia hidrográfica. Eles procuram descrever os processos pelos quais a água passa no seu ciclo e os fenômenos físicos e químicos envolvidos, por meio de equações matemáticas, com o objetivo de entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. Os modelos hidrológicos permitem realizar previsões, analisar os efeitos do clima e das alterações no uso do solo, verificar a disponibilidade de água, bem como apoiar à tomada de decisão sobre a gestão e o gerenciamento dos recursos hídricos. O presente estudo teve por objetivo avaliar a vazão mínima, com o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), a fim de verificar o potencial de aproveitamento hidrelétrico da bacia hidrográfica do rio Capivari (BHRC) (620,85 km²), situada entre as latitudes 27°48'03" S a 28°11'13" S e longitudes 48°55'52" W a 49°04'29" W, no sul do estado de Santa Catarina. O SWAT permite simular diferentes processos físicos em bacias hidrográficas não instrumentadas, e foi utilizado para avaliar a vazão de mínima (Q_{98}) na BHRC. As simulações no SWAT foram realizadas em intervalos de tempo mensal, no período de 01/01/2008 a 31/12/2015. Para avaliar o desempenho do modelo, os dados mensais de vazões mínimas simulados foram comparados com as vazões mínimas medidas, na seção de monitoramento da BHRC, por meio de inspeção visual dos hidrograma e hietograma, \log do coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE_{log}) e coeficiente de determinação (R^2). Na simulação com calibração, o resultado obtido para NSE_{log} foi de 0,85, com R^2 de 0,89. Para Moriasi et al. (2007) valores de R^2 maiores que 0,5 são considerados aceitáveis e para Souza (2009) valores de NSE_{log} maiores que 0,71 são considerados satisfatórios para análise de vazões mínimas, evidenciando assim, que o modelo SWAT pode ser utilizado para este tipo de estudo na BHRC. Dessa maneira, obteve-se a vazão mínima do recurso e o potencial hidrelétrico estimado para a seção de medição da bacia em estudo foi de 0,35 MW.

Palavras-chave: vazões mínimas, modelo SWAT, potencial hidrelétrico.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de uma população, o meio ambiente e a necessidade de energia para suprir a demanda crescente das atividades econômicas atuais são fatores que se correlacionam e também são de fundamental importância quando se trata de processos de conversão de energia, como a hidroeletricidade (FLOREZ, 2014).

A crescente utilização mundial do recurso hídrico como fonte de energia elétrica, vem ocorrendo de forma gradativa nos últimos anos. Dentre os fatores que contribuíram para isso, destacam-se a implantação de empreendimentos hidrelétricos de grande porte (potência superior à 30 MW), que foi afetada pelas restrições de caráter ambiental. As usinas de grande porte, após o represamento, causam impactos significativos sobre a fauna, flora e o cotidiano de uma população, devido a formação dos seus reservatórios, aumento do nível dos rios ou modificações em seu curso (ANEEL, 2008).

No entanto, não se pode ignorar que o Brasil possui como principal matriz energética a hidroeletricidade, que é gerada pelo aproveitamento do fluxo das águas (ANEEL, 2008). Essa característica é devido a boa disponibilidade e o grande potencial para aproveitamento energético dos recursos hídricos existentes no País. Ainda assim, segundo o Plano Nacional de Energia (PNE) (2007), o aproveitamento do seu potencial hidráulico é relativamente pequeno (da ordem de 30%), quando comparado a países desenvolvidos, como França (acima de 90%) e Alemanha (74%).

Portanto, estudos sobre o potencial de aproveitamento energético dos recursos hídricos são fundamentais, pois podem servir como base para o planejamento energético do País.

Neste contexto, as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) são uma boa alternativa para que o potencial hídrico do País seja aproveitado. Esses empreendimentos caracterizam-se pela geração de energia por meio da vazão hídrica, com mínimo ou nenhum represamento dos recursos hídricos (ANEEL, 2008).

No Brasil, atualmente há um grande interesse na construção de PCH's, devido ao fato de causarem menos impactos ambientais e levarem menos tempo para serem construídas, quando comparado a usinas hidrelétricas de grande porte. Adicionalmente, as PCH's têm a capacidade de atender à crescente demanda de energia elétrica do mercado nacional, proporcionando um melhor atendimento às necessidades de carga de pequenos centros urbanos e regiões rurais, visto que, na maioria dos casos, complementa o fornecimento de energia realizado pelo Sistema Interligado Nacional (SIN).

Ainda que o impacto ambiental de uma PCH possua menor intensidade quando comparado com hidrelétricas de grande porte, há a necessidade de que estudos hidrológicos sejam realizados na bacia hidrográfica onde a mesma será instalada, a fim de verificar possíveis alterações no curso e/ou vazão do rio e compreender melhor os processos hidrológicos que ocorrem na bacia, dentre eles, destacam-se: a precipitação, infiltração de água no solo, armazenamento, percolação, escoamentos (superficiais, sub-superficiais e subterrâneos), interceptação, escoamento fluvial e evapotranspiração. Tais processos compõem o ciclo hidrológico, que apresenta como característica a variabilidade espacial e temporal.

Souza (2011) destaca que as vazões mínimas são utilizadas como referencial para a concessão de outorgas de direito de uso dos recursos hídricos, e são alvos de preocupações de diversos órgãos governamentais e de pesquisadores, para verificar a disponibilidade hídrica de uma região. Ainda segundo o autor, a estimativa da disponibilidade hídrica (variabilidade) requer informações medidas em campo por meio de estações de monitoramento (pluviométricas e fluviométricas). Entretanto, essas estações nem sempre estão disponíveis nas escalas de espaço e tempo adequadas. Assim, geralmente, a disponibilidade hídrica é obtida nos locais de interesse, utilizando-se métodos de regionalização hidrológica (SOUZA, 2011). A regionalização consiste na transferência de informações hidrológicas de um local para outro, dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante (TUCCI, 2005).

A vazão mínima do recurso hídrico é uma das variáveis que compõe o estudo do potencial hidrelétrico a ser instalado e sua estimativa é de fundamental importância para que o cálculo do potencial seja realizado com a maior precisão possível. No entanto, a estimativa de vazões mínimas de um rio em um longa série de dados é uma tarefa de difícil execução, pois depende de inúmeros fatores e variáveis ambientais relacionados à topografia (relevo), geologia, uso da terra, clima, entre outros (SOUZA e SANTOS, 2013).

O monitoramento de variáveis ambientais para realização de estudos hidrológicos é realizado por meio de estações fluviométricas, pluviométricas e meteorológicas, as quais registram informações das séries históricas de vazão, chuva, temperatura do ar, velocidade do vento, dentre outras variáveis, em diferentes escalas de tempo e espaço. No entanto, esse monitoramento, muitas vezes, tem custo elevado, e nem sempre é possível abranger toda a área de interesse. Por essa razão, são utilizados modelos hidrológicos, os quais foram desenvolvidos a fim de simular os processos que compõem o ciclo hidrológico, segundo sua variação espacial e temporal.

Os modelos hidrológicos são ferramentas que possibilitam a representação do sistema real de uma bacia hidrográfica, por meio de equações matemáticas, e necessitam das variáveis

ambientais registradas nas estações de monitoramento. Os modelos permitem entender e analisar os resultados provenientes de diferentes tipos de dados de entrada, e assim, prever condições que sejam diferentes das medidas em campo (TUCCI, 2005).

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo hidrológico que permite representar diferentes processos físicos em uma bacia hidrográfica como, a evapotranspiração, infiltração, escoamento de água, entre outros. O seu objetivo é analisar os impactos gerados por alterações do uso e manejo do solo sobre o escoamento da água (superficial e subterrâneo), produção de sedimentos e também na qualidade da água, de forma especializada (distribuída) em bacias hidrográficas complexas, não instrumentadas (NEITSCH et al., 2009). As variáveis e parâmetros utilizados pelo modelo dependem do espaço e do tempo.

Os resultados do SWAT permitem a construção de hietrogramas, hidrogramas (chuva-vazão) e sedimentogramas (vazão-sedimentos) da bacia hidrográfica para análise da vazão e fluxo de sedimentos.

Desta forma, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a vazão mínima outorgável conforme legislação vigente em Santa Catarina, com o modelo SWAT, a fim de verificar o potencial de aproveitamento hidrelétrico do exutório da Bacia Hidrográfica do Rio Capivari (BHRC).

A bacia do rio Capivari, abrange os municípios de São Bonifácio, São Martinho, Armazém e Gravatal. Segundo o plano da bacia do rio Tubarão e Complexo Lagunar (SDMa, 2002) a BHRC é considerada propícia a instalação de empreendimentos hidrelétricos. Nessa bacia existem estações pluviométricas com dados monitorados desde 1987. Além dessas estações, existe uma estação telemétrica (código 84548002), instalada em 2012, de responsabilidade da Agência Nacional das Águas (ANA), que deu continuidade ao monitoramento de vazão no local, a qual já ocorria desde 1981. Por essas razões, definiu-se que área à montante da estação Telemétrica de São Martinho – Jusante é a bacia hidrográfica de estudo utilizada no presente trabalho, representando uma fração da BHRC, onde abrange apenas os municípios de São Bonifácio e São Martinho.

Cabe salientar que na BHRC estão em construção duas PCH's, denominadas de Volta Grande (3,13 MW) e Capivari (18 MW), de responsabilidade da COOPERZEM (Cooperativa de Distribuição de Energia Elétrica) e Cooperativa de eletrificação Braço do Norte, respectivamente (CERBRANORTE). Por isso, estudos sobre vazões mínimas têm importância para o gerenciamento dos recursos hídricos, uma vez que essas vazões são utilizadas como referência para concessão de outorga de uso dos recursos hídricos, a qual define a quantidade de água que pode ser utilizada para aproveitamento energético.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir estão descritos os principais pressupostos teóricos relacionados ao tema da presente pesquisa.

2.1 Energia hídrica no contexto mundial, nacional e regional

Algumas fontes energéticas renováveis, como hídrica, eólica e solar, estão se desenvolvendo cada vez mais mundialmente (IEAa, 2014). O potencial de produção de energia por meio de diversos recursos naturais traz benefícios para qualquer país e o fato de possuir diversidade em sua matriz energética, causa a minimização com relação a dependência do fornecimento externo, proporcionando a segurança de prestação de um serviço básico ao avanço socioeconômico de toda uma população (ANEEL, 2008). Ainda segundo ANEEL (2008), no mercado internacional, a energia de fonte hídrica categoriza-se por ser uma fonte limpa, devido ao seu modo de operação não ocasionar a emissão de gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂).

A energia de fonte hídrica está em uso em 159 países e fornece 16,3% de toda a energia elétrica disponível (cerca de 3.500 TWh em 2010), uma quantidade consideravelmente maior que todas as demais fontes renováveis unidas (3,6%), como é representado na Figura 1 (IEAb, 2012).

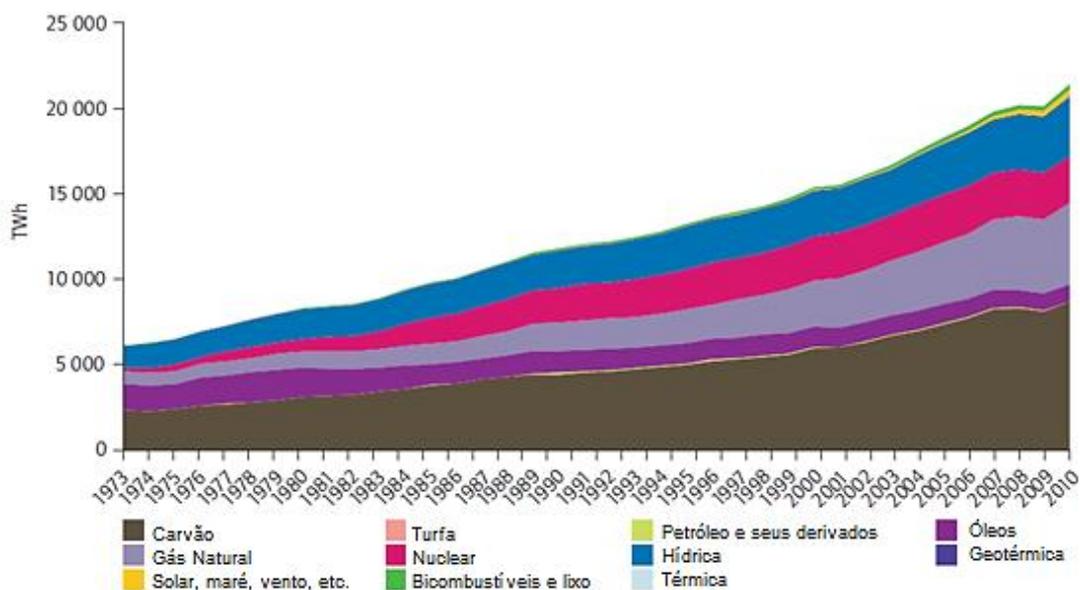


Figura 1- Geração de eletricidade mundial por combustível, 1973-2010 (Fonte: adaptado IEA, 2012)

No Brasil, a energia hidráulica possui grande representatividade, sendo que aproximadamente 90% de toda a energia consumida no país é proveniente de tal fonte (ANEEL, 2008).

De acordo com o Banco de Informações da Geração (BIG) (2016), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), existem 1226 empreendimentos de fonte de energia hidrelétrica em operação, onde 449 são classificadas como Pequenas Centrais Hidrelétricas, detendo um potencial de produção de energia elétrica de 4.859.582 kW.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2015, a maior fonte interna de energia elétrica no país é a hidráulica (65,2%), como mostra a Figura 2.

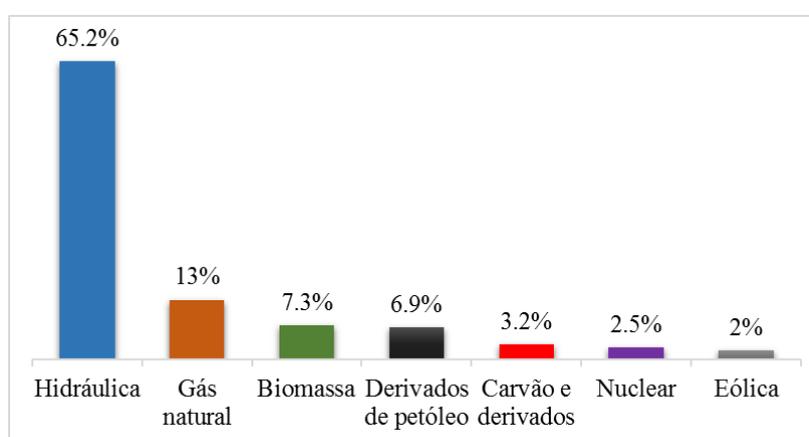


Figura 2 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte no Brasil (Fonte: Adaptado Balanço Energético Nacional, 2015)

O clima diversificado e a abundância privilegiada de recursos hídricos do país, determinam sua matriz energética, onde a geração de energia por meio de usinas hidrelétricas nas regiões de abundância hídrica suplementam a geração nas demais regiões do país em que há estiagem (ELETROBRAS, 2014).

O Brasil é o país que detém o maior potencial hidrelétrico, em escala mundial, gerando um total de 247.464,98 MW no conjunto de todos os empreendimentos hidrelétricos (SIPOT, 2015).

Especificamente, Santa Catarina possui o total de 66 pequenas centrais hidrelétricas em operação, que corresponde a 0,21% do montante de energia gerada a partir de recursos hídricos (BIGb, 2016).

Evidencia-se na Tabela 1, o tipo de fonte de energia explorada no estado, a quantidade de empreendimentos e a sua potência instalada em operação (kW) no mês de agosto de 2016.

Tabela 1 – Tipo e quantidade de empreendimentos hidrelétricos em operação em SC e sua respectiva potência gerada.

Tipo	Quantidade	Potência (MW)
CGH	133	110,28
EOL	15	242,50
PCH	64	521,79
UFV	3	4,00
UHE	13	2.593,006
UTE	113	1.110,142
Total	341	4.581,717

*Central Geradora Hidrelétrica (CGH); Central Geradora Eólica (EOL); Pequena Central Hidrelétrica (PCH); Central Geradora Solar Fotovoltaica (UFV); Usina Hidrelétrica (UHE); Usina Termelétrica (UTE). (Fonte: BIGb 2016).

Além de a fonte hídrica representar mais de 50% dos empreendimentos em operação em Santa Catarina, também estão em fase de construção 7 PCH's e uma UHE no estado, o que caracteriza a região com uma matriz energética predominantemente hídrica, assim como o restante do país (BIGb, 2016).

A área de estudo pertence a Região Hidrográfica nove (RH-9) e segundo o Panorama de Recursos Hídricos de Santa Catarina (PERH) (2005), verificou-se uma tendência de expansão de empreendimentos de PCH para essa região desde 2005.

A RH-9 possui 8 PCH's em operação e 2 em construção (BIGb, 2016). Contudo, em se tratando apenas dos municípios que a sub-bacia do rio Capivari abrange (São Bonifácio e São Martinho), apresenta-se no Quadro 1, a relação das duas pequenas centrais hidrelétricas situadas nessa região, o respectivo rio em que o empreendimento está situado e sua potência em MW (ANEEL, 2016).

Quadro 1 - Pequenas Centrais Hidrelétricas localizadas nos municípios abrangentes da BHRC.

Nome	Rio	Potência (MW)	Localização
Volta Grande	Capivari	3,13	São Bonifácio/São Martinho
Capivari	Capivari	18	São Bonifácio/São Martinho

Fonte: Adaptado ANEEL, 2016.

Neste contexto, verifica-se o interesse na análise de outros possíveis pontos na BHRC que sejam atrativos para a implantação de empreendimentos com a finalidade de geração de energia elétrica.

2.2 Características de PCH's

Conforme a resolução normativa número 673 da ANEEL (2015), considera-se PCH, o empreendimento que produz energia elétrica independentemente; que possua potência que seja superior a 3.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, e que a área do reservatório de água seja inferior ou igual a 13 km², com exclusão da calha do leito regular do rio.

Grande parte das pequenas centrais hidrelétricas geradoras de energia encontram-se nas regiões sul e sudeste do país, especificamente nas bacias do Paraná e Atlântico Sudeste, junto aos centros consumidores de energia (ANEEL, 2008).

As PCH's, segundo a Eletrobras (2000), podem ser classificadas segundo à capacidade de regularização do reservatório: (i) fio d'água, onde a central não possui reservatório e opera com diferentes vazões, causando oscilações na produção de energia, em períodos de estiagens e cheias; (ii) de acumulação (regularizada diariamente), em que há um reservatório para o período de estiagem do rio, a fim de oferecer a potência necessária para suprir a demanda máxima do mercado consumidor; (iii) de acumulação (regularizada mensalmente), que considera dados de vazões médias mensais no dimensionamento do reservatório e o fornecimento de energia é regularizado pela quantidade de água disponível no reservatório.

As PCH's se adequam a diferentes condições de altura de queda d'água devido às características topográficas de cada local de implantação. Por esse fator, outra possível classificação pode ser designada aos empreendimentos, referente à altura de queda de projeto (H_d) e potência instalada (P), conforme o Quadro 2 apresenta (FLÓREZ, 2014; ELETROBRAS, 2000).

Quadro 2 – Classificação das PCH's quanto à potência e queda de projeto.

Classificação das Centrais	Potência - P (kW)	Queda de projeto - H_d (m)		
		Baixa	Média	Alta
Micro	$P < 100$	$H_d < 15$	$15 < H_d < 50$	$H_d > 50$
Mini	$100 < P < 1.000$	$H_d < 20$	$20 < H_d < 100$	$H_d > 100$
Pequenas	$1.000 < P < 30.000$	$H_d < 25$	$25 < H_d < 130$	$H_d > 130$

Fonte: ELETROBRAS, 2000.

Portanto, a estimativa da vazão mínima outorgável, assim como a altura de queda de um empreendimento hidrelétrico, do tipo PCH, são fatores importantes a serem determinados na

estimativa do potencial hidrelétrico de um recurso, pois a partir desses resultados, pode ser realizada a respectiva caracterização do empreendimento.

2.3 Diretrizes para avaliação preliminar do potencial hidrelétrico para implantação de PCH's

A definição do potencial hidrelétrico de uma PCH depende de cada país, sendo influenciada pelo nível de desenvolvimento e também pela sua respectiva política energética (FLÓREZ, 2014). O autor considera ainda que, o potencial para geração de energia de um recurso hídrico varia com o tempo. Isso se deve ao fato de que o montante de água disponível para a produção de energia elétrica está sujeito aos fenômenos que envolvem o ciclo hidrológico, como a evapotranspiração, escoamento superficial e subterrâneo, precipitação, dentre outros, que possuem como unidade de análise a bacia hidrográfica.

Também deve-se considerar que, a utilização da água para a produção de energia está sujeita a outorga pelo Poder Público, conforme a lei 9.433/97, seção III, art. 12º, de modo a não prejudicar a qualidade e quantidade do recurso, perante aos demais usos em outras atividades humanas (BRASIL, 1997).

A estimativa do potencial hidrelétrico de uma PCH é a primeira, das seis etapas fundamentais para a implantação de um empreendimento hidrelétrico, conforme observados na Figura 3 (MME, 2007).

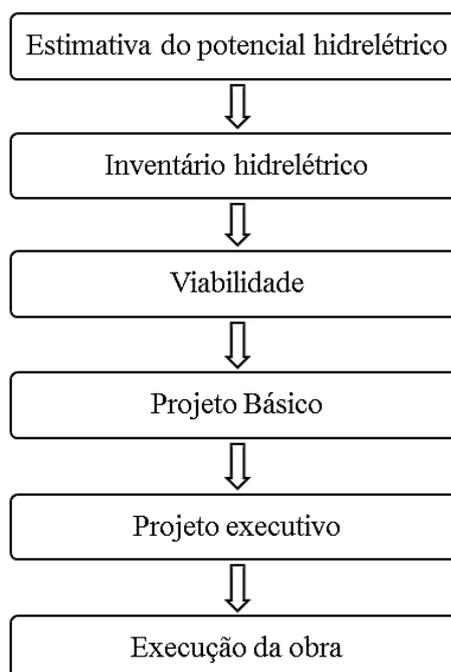


Figura 3 - Etapas para a implantação de um empreendimento hidrelétrico. (Fonte: Autor, 2016)

Na etapa inicial ocorre a análise das características da bacia hidrográfica referentes aos aspectos hidrológicos, geológicos, topográficos e ambientais, a fim de averiguar a predisposição do local para geração de energia elétrica (MME, 2007).

No estudo topográfico devem ser analisadas as curvas de nível do local na maior escala representada possível, para que haja maior precisão na análise dos dados (SOUZA, 1999). A seleção do local para a implantação de uma PCH deve levar em consideração a queda natural do terreno, que quanto mais acentuada, maior a queda bruta aproveitável (ELETROBRÁS, 2000).

O estudo hidrológico, consiste em obter os valores da variável de vazão média do recurso hídrico, através de séries históricas de dados. Esse parâmetro é necessário para realizar a estimativa do potencial da pequena central hidrelétrica (FLÓREZ, 2014).

Quanto ao estudo ambiental, o empreendimento deve estar adequado às leis vigentes referentes ao estado e município de implantação, que respeitam sempre a esfera Federal (SOUZA, 1999).

Na legislação brasileira, referente à manutenção do equilíbrio ecológico e vazões mínimas para aproveitamento hidrelétrico estão vigentes no Brasil as Leis nº 6.938/81 e 9.433/81, Resolução nº 129/11 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), e também as Portarias da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável (SDS) nº 035/07 e 036/10.

A Lei nº 6.938/81, trata sobre a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e visa o desenvolvimento econômico-social aliado a preservação da qualidade do meio ambiente, assim como do equilíbrio ecológico, e estabelece critérios e padrões de qualidade ambiental e normas relativas ao uso e manejo de recursos ambientais, bem como o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias nacionais voltadas para o uso racional de recursos ambientais, dentre outros objetivos (BRASIL, 1981).

Já a lei nº 9.433/87, apresenta a outorga de direitos de uso de recursos hídricos, como um instrumento, que visa assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água, assim como o efetivo exercício dos direitos de acesso à água. A lei ressalta ainda que, entre os diversos usos da água que necessitam de outorga, está o aproveitamento do potencial dos recursos hídricos para geração de energia elétrica (BRASIL, 1997).

Visto isso, a Resolução nº 129/11 do CNRH, relata que se deve estabelecer critérios diferenciados para vazão mínima remanescente, dependendo de cada situação a ser outorgada. Referente aos empreendimentos com finalidade de geração de energia hidrelétrica, em Santa Catarina, deve-se respeitar a Portaria nº 035/07 e nº 036/10 (BRASIL, 2011; BRASIL, 2007; BRASIL 2010).

A Portaria nº 035/10 refere-se aos procedimentos para uso de potencial de energia hidráulica para aproveitamentos hidrelétricos em rios localizados no estado, e dá outras providências. Nesta Portaria, torna-se explícito que a reserva de disponibilidade hídrica, para geração de energia elétrica é caracterizada pela série de vazões médias mensais, aprovada tecnicamente pela ANEEL, subtraída de vazões destinadas a outros usos da água. Além disso, a declaração de reserva de disponibilidade hídrica, para licitar a concessão ou autorizar o uso do potencial de energia hidráulica em corpos de água, somente será emitida pelo órgão outorgante após solicitação da ANEEL (BRASIL, 2007). No entanto, a Portaria nº 036/10 restringe as vazões mínimas outorgáveis com relação aos usos para captações de cursos d'água para o valor de vazão de 50% da Q_{98} (vazão de permanência por 98% do tempo no recurso hídrico).

No Brasil, a grande maioria dos empreendimentos de PCH's são projetados para ser a fio d'água (sem reservatório) ou com um pequeno reservatório, que compensa diariamente ou semanalmente somente a descarga d'água, sendo que, o aproveitamento hidrelétrico do recurso hídrico provém apenas da queda d'água que flui em seu regime natural (SCHEREIBER, 1977).

Segundo a Eletrobras (2000), para que seja realizada a análise de viabilidade de implantação de uma PCH, deve-se, primeiramente, realizar a estimativa de Energia Firme (EF_e) do local. Essa energia é conceituada como a máxima produção contínua de energia que pode ser atingida, considerando a ocorrência da menor vazão registrada no histórico de vazões do recurso hídrico onde o empreendimento será instalado (ANEEL, 2005).

Dessa maneira, a energia firme pode ser calculada por meio da Equação 1.

$$EF_e = \frac{\rho \cdot \mu \cdot 9,81 \cdot Q \cdot H_{liq}}{1000} \quad (1)$$

Onde EF_e é a energia firme estimada em kW, considerando-se Q e H_{liq} constantes durante o funcionamento da usina; ρ é a massa específica da água, sendo 1000 kg.m^{-3} ; μ é o rendimento do conjunto turbina-gerador, onde sugere-se o valor final de 0,85 (adimensional); O valor 9,81 é a aceleração da gravidade na Terra (m.s^{-2}); Q é a vazão mínima medida no local, ambas em $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$; H_{liq} é a queda líquida (m) (RICARDO, 2006; ELETROBRAS, 2000).

A partir do valor estimado para EF_e , é possível então calcular o valor da potência hidráulica por meio da Equação 2.

$$Pot = \frac{EF_e}{F_c} \quad (2)$$

Onde Pot é a potência instalada (kW) e F_c é o fator de capacidade, que é um indicador de desempenho operacional obtido a partir da razão de geração média e a capacidade de geração média disponível. O valor de F_c é estimado em 0,55 (adimensional) para esta fase de projeto, segundo Eletrobras (2000).

Visando os aspectos citados e as equações para a definição de potencial hidráulico de um recurso hídrico, os estudos para o projeto de uma PCH devem avaliar: (i) o tempo de permanência de que determinada vazão estará disponível para a geração de energia; (ii) a altura da queda da água associada ao local; e (iii) o valor do rendimento do conjunto associado turbina-gerador (SCHEREIBER, 1977).

A vazão é a quantidade de água que passa por uma seção em um determinado período de tempo, sendo que essas medições de vazões são necessárias para estimar a disponibilidade de água em um determinado ponto de um rio, considerando os diversos usos da água (DORNELLES e COLLHISCHONN, 2013).

Além disso, a vazão pode ser dividida em vazões mínimas, médias e máximas, conforme um objetivo específico para o qual serão determinadas. No caso de estudos que envolvam a utilização da água para fins de aproveitamento hidrelétrico é necessário estimar a vazão mínima do rio conforme a legislação vigente para esse tipo de empreendimento.

Ainda, cabe ressaltar a importância de um estudo topográfico da região da bacia hidrográfica, com relação à declividade do rio em sua extensão, a fim de averiguar a altura de queda disponível, para realização do cálculo da estimativa do potencial hidrelétrico do rio, e assim verificar a viabilidade de implantação do empreendimento (ELETROBRAS, 2000).

2.3.1 Vazão mínima para determinação do potencial hidrelétrico de PCH

A vazão mínima ou vazão remanescente é a menor vazão existente em uma série histórica de um curso d'água, no período de escassez (TUCCI, 2005). Para Silveira e Silveira (2001), vazões mínimas são aquelas que ocorrem nos períodos de estiagem, devido ao esgotamento das reservas de água do subsolo que afloram nas fontes e nas calhas dos rios. Já o CNRH (BRASIL, 2011) define a vazão mínima como a menor vazão a ser mantida no curso de água em seção de controle.

A crescente utilização do recurso hídrico, aliado ao desenvolvimento econômico, refere-se não somente ao aumento da quantidade do recurso utilizada, mas também na grande variedade de seu uso nos diversos setores da economia (processos industriais, agricultura, pecuária, produção de energia elétrica) (TUCCI, 2002).

Tucci (2002), caracteriza a utilização do recurso hídrico para fins energéticos, como sendo não consuntivo, termo que se refere ao uso do recurso, de maneira com que o mesmo retorne à sua fonte, sem nenhuma ou com mínima alteração de disponibilidade.

Segundo Cruz e Tucci (2007), compreende-se como disponibilidade hídrica a parcela de vazão do recurso que a sociedade pode utilizar para o seu desenvolvimento, de modo a não prejudicar o equilíbrio do sistema ecológico.

A vazão no tempo e no espaço de uma bacia hidrográfica é a resposta à precipitação, que ocorre sobre a mesma, influenciada pelo tipo e uso do solo, topografia, clima e geologia do local (SOUZA e SANTOS, 2013; CRUZ e TUCCI, 2007).

Contudo, devido a característica mundial de distribuição irregular das águas superficiais e subterrâneas, a disponibilidade hídrica é um fator de grande relevância para a implantação de um empreendimento hidrelétrico ou para os demais usos do recurso em outras atividades. Isso ocorre, devido ao fato de que a escassez de água em determinada região, restringe e retarda o desenvolvimento social e econômico do país (KOBAYAMA; MOTA; CORSEUIL, 2008).

No Brasil, a Resolução nº 129/11 do CNRH, aponta que, para determinar a vazão mínima de referência, os seguintes itens devem ser considerados: (i) vazão de referência; (ii) os critérios de outorga; (iii) uso e demanda características específicas dos usos e das interferências nos recursos hídricos à jusante e montante; (iv) os critérios de gestão estabelecidos nas bacias hidrográficas dos corpos de água de interesse; (v) as prioridades e diretrizes estabelecidas nos planos de recursos hídricos; (vi) o estabelecido pelo órgão de meio ambiente competente, no processo de licenciamento.

Seguindo a Resolução nº 129/2011 e respectivas legislações estaduais, a vazão de referência outorgável para a análise de disponibilidade hídrica para captações de cursos d'água, em Santa Catarina, é determinada pela Portaria nº 036/2010, sendo esta, mais restritiva que a Portaria nº 035/2007. Devido a restrição, deve-se atender a Portaria nº 036/2010 com relação aos cálculos de vazões mínimas outorgáveis, sendo considerada 50% da Q_{98} .

Para estimar a vazão mínima do recurso hídrico, pode-se utilizar a curva de permanência das vazões, que independe dos usos existentes do recurso em uma bacia hidrográfica (CRUZ e TUCCI, 2007).

Segundo Tucci (2002), a curva de permanência é dada pela relação da vazão ou nível de um rio e pela probabilidade de ocorrência de vazões maiores ou iguais em um determinado período de tempo. Em outras palavras, a curva representa a relação entre a vazão e a frequência com que esta mesma vazão do recurso seja igualada ou superada em todo o período histórico de dados de vazões empregado para sua construção (DORNELLES e COLLISCHONN, 2013).

A curva de permanência pode ser estimada a partir de medições diárias, semanais ou mensais, e isso depende dos dados disponíveis para sua construção (DORNELLES e COLLISCHONN, 2013). No entanto, os autores recomendam que independentemente do tipo de dado disponível, faça-se uso do maior período histórico de dados possível, a fim de que haja o menor erro na estimativa de vazões mínimas.

As séries históricas de vazões são geradas por meio de estações fluviométricas e podem ser obtidas a partir da relação entre cota e descarga líquida (curva-chave) (RICARDO, 2006). Esse método de obtenção de vazões é realizado a partir de medições das vazões na seção de interesse do rio, juntamente com os respectivos nível de água, e então relacionam-se as medições por meio de expressões matemáticas na forma exponencial, polinomial, dentre outras (TUCCI, 2002).

Cruz e Tucci (2007), afirmam que a curva de permanência para a estimativa de vazão mínima, descreve a probabilidade de ocorrência de vazões em qualquer período, podendo ser utilizado como “garantia” de ocorrência dessas vazões remanescentes para um cenário futuro, possibilitando o planejamento de gestão dos recursos hídricos.

A curva de permanência pode ser utilizada para estudos de enchimento de reservatórios, navegação, estimativa de vazões para verificação de potência ótima para o dimensionamento de uma PCH, dentre outros (ELETROBRAS, 2000; CRUZ e TUCCI, 2007; TUCCI, 2005; DORNELLES e COLLISCHONN, 2013).

Santos et al. (2015) utilizaram a curva de permanência de vazões para estimar as variações de vazões da bacia Cancela - Tamandaí, localizada em Santa Maria-RS, com série de dados diários coletados no período de janeiro de 2013 a março de 2014. Já Vinagre (2010), desenvolveu um modelo hidrológico para simular curvas de permanência para bacias hidrográficas da região Amazônica, com o objetivo de determinar as vazões Q_{90} e Q_{95} , a fim de calcular o potencial hidráulico para instalação de PCH's de baixa queda na Amazônia e otimizar o uso de turbinas axiais nos empreendimentos.

Nos trabalhos desenvolvidos por Veiga e Nora (2002), Guitarrara (2012) e Ricardo (2006), foi considerado para realização do cálculo do potencial hidrelétrico, a vazão mínima Q_{95} da curva de permanência, conforme o Manual de Inventário Hidrelétrico e Bacias

Hidrográficas (2007), Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (2000) e também o Manual de Micro e Minicentraís hidrelétricas (1985), todas as referências citadas foram desenvolvidos pelas Eletrobras (2000).

Martins et al. (2013) utilizaram a curva de permanência na bacia hidrográfica do Rio São Mateus-ES, a fim de que se atenda aos padrões ambientais do corpo receptor e concessão de outorgas de captação e de lançamento, com relação às vazões mínimas Q_{90} e Q_{95} .

2.4 Modelagem hidrológica

Para o gerenciamento dos recursos hídricos, obras hidráulicas e para realização de medidas preventivas de maneira eficaz para a sociedade, é necessário o estudo e entendimento dos processos que envolvam o movimento da água no ciclo hidrológico (MORAES et al., 2003).

Os modelos podem ser considerados como representações do comportamento de um sistema ou de uma realidade complexa, visando melhorar o conhecimento de um determinado aspecto e o seu contexto no mundo físico real, a fim de que solucione problemas que seriam onerosos para uma solução experimental ou muito complicado para um tratamento analítico (matemático) (TUCCI, 2005).

A hidrologia trata dos fenômenos naturais complexos do ciclo hidrológico. Os processos como a precipitação, evaporação, infiltração e escoamento em rios, dependem de um grande número de fatores, que dificulta a análise quantitativa e qualitativa dos mesmos (TUCCI, 2005). Ainda segundo o autor, esses fatores são de origem complexa, pois interagem entre si e com fatores externos, como por exemplo, a topografia do terreno, uso e tipo do solo, vegetação, geomorfologia.

Na hidrologia, os modelos procuram descrever os processos pelos quais a água passa no seu ciclo e os fenômenos físicos e químicos envolvidos, por meio equações matemáticas, com o objetivo de entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas (TUCCI, 2005).

Neste contexto, os modelos hidrológicos se destacam dentre as principais ferramentas utilizadas para solucionar problemas relacionados ao uso dos recursos hídricos, uma vez que permitem realizar previsões, analisar os efeitos do clima e das alterações no uso do solo, verificar a disponibilidade de água, bem como apoiar à tomada de decisão sobre a gestão e o gerenciamento dos recursos hídricos, entre outras aplicações (GASSMAN et al., 2007; TUCCI, 2005; BRIGHENTI, BONUMÁ e CHAFFE, 2016).

Em virtude da interação dos processos hidrológicos com os demais fatores físicos e químicos do meio ambiente, a tradução de tais processos em equações matemáticas, a fim de que se possa realizar simulações e prever possíveis cenários ambientais, torna-se uma tarefa de alta complexidade. Esse fator explica o grande número de modelos hidrológicos existentes para a gestão ambiental, uma vez que, cada modelo difere em função dos dados utilizados, representação de determinados processos e os objetivos a serem atingidos (TUCCI, 2005).

A avaliação do comportamento dos fenômenos hidrológicos (e sedimentológicos) em bacias hidrográficas, por meio de modelos, são cada vez mais recorrentes na gestão dos recursos hídricos, simulação e previsão de cenários para avaliação de impacto ambiental e também em estudos de projetos hidrológicos e hidrelétricos.

2.4.1 Modelo SWAT

O modelo SWAT foi desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold, da *Agricultural Research Service* (ARS), pertencente ao *United States Department of Agriculture* (USDA). O modelo é utilizado para avaliação de processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas (NEITSCH et al., 2009).

O SWAT é um modelo hidrológico do tipo físico, distribuído e de simulação contínua, que permite representar diferentes processos físicos em uma bacia hidrográfica como por exemplo, a evapotranspiração, infiltração, escoamento de água, entre outros, com o objetivo de analisar os impactos gerados por alterações no uso do solo sobre o escoamento (superficial e subterrâneo), produção de sedimentos e também na qualidade da água, de forma especializada em bacias hidrográficas grandes e complexas não instrumentadas (ARNOLD e FOHRER, 2005).

Este modelo é capaz de simular diferentes cenários de uso do solo natural ou antrópico, permitindo, desta forma, a análise de escoamento de água, a produção de sedimentos, a propagação de nutrientes e agroquímicos, de forma distribuída (especializada) na bacia. Os principais componentes do modelo incluem hidrologia, clima, sedimentos, temperatura do solo, crescimento de plantas, nutrientes, pesticidas e manejo agrícola (ARNOLD et al., 1998). Também inclui sub-rotinas de escoamento superficial, percolação, fluxo lateral sub-superficial, fluxo de retorno do aquífero raso e evapotranspiração (NEITSCH et al., 2009).

A simulação hidrológica realizada pelo modelo SWAT é dividida em duas fases. A primeira divisão consiste na fase terrestre do ciclo hidrológico. Essa fase controla a quantidade de água e sedimentos para o canal principal em cada sub-bacia. A segunda, é a fase de

propagação da água no ciclo hidrológico, a qual pode ser definida como o movimento de água, sedimentos, entre outros, por meio da rede de canais da bacia hidrográfica para a sua saída (exutório) (NEITSCH et al., 2009).

Ainda segundo NEITSCH et al. (2009), o modelo utiliza dados espaciais (mapas topográficos, uso do solo e tipos de solo), dados de clima, características de solos, manejo do solo, dados sobre os reservatórios (barragens), dados sobre a vegetação.

O SWAT possui uma interface *ArcSWAT*, que permite o funcionamento do programa como uma das extensões do *ArcGIS* da ESRI, constituindo-se, assim, um Sistema de Informações Geográficas (SIG). A utilização deste modelo com a interface *ArcSWAT*, proporciona a tradução e visualização dos dados geoespaciais, assim como a leitura e armazenamento de dados meteorológicos, solos e uso do solo, que o modelo necessita como dados de entrada (CARVALHO, 2014).

Para o melhor desempenho do modelo, primeiramente a bacia hidrográfica é dividida em múltiplas sub-bacias com base nas características climáticas e Unidade de Resposta Hidrológica (URH). A divisão de área em URH's é feita de acordo com um único uso do solo, cobertura vegetal, classificação do solo e altitude e os cálculos dos parâmetros do ciclo hidrológico são realizados em cada uma das URH's, de modo a obter maior precisão nos resultados obtidos por meio do modelo (NEITSCH et al., 2009).

Vários estudos têm sido realizados em bacias hidrográficas utilizando o modelo SWAT, por exemplo, o escoamento superficial (LINO et al, 2009); a vazão mínima dos rios (SOUZA e SANTOS, 2013); o balanço hídrico e a vazão (BONUMÁ et al., 2013); produção de sedimentos (ZANIN, 2015).

2.4.2 Aplicação do modelo SWAT em bacias hidrográficas para o aproveitamento energético

Diferentes tipos de análises têm sido realizados com SWAT, incluindo as alterações climáticas e/ou mudança cenários de uso da terra, melhores estratégias de irrigação, os impactos das melhores práticas de manejo, a adoção de culturas bioenergéticas, e transporte e de sedimentos, nutrientes e/ou poluentes pesticidas, entre outros (GASSMAN et al., 2007; GASSMAN et al., 2014).

Dentre as diversas aplicações do modelo SWAT destacam-se os estudos realizados em bacias hidrográficas da região norte de Santa Catarina: (i) Bonumá et al. (2013) que analisaram o balanço hídrico da bacia do rio Preto, e através das simulações com o SWAT evidenciaram

que o escoamento de base, que é um componente importante da produção total de água da bacia representa 54% do escoamento total medido e simulado; (ii) Malutta (2012) analisou espacialmente os processos hidrossedimentológicos na bacia do Rio Negrinho (SC), e obteve um bom ajuste para a vazão e sedimentos; (iii) Souza e Santos (2013) aplicaram o modelo SWAT para estimativa de vazões mínimas (Q_{95}), na bacia do Altíssimo Rio Negro (788 km²), e obtiveram resultados satisfatórios nessa mesma bacia hidrográfica. Além disso, seus estudos demonstraram que, em bacias com áreas inferiores a 100 km², há uma maior variabilidade das vazões Q_{95} simuladas, e a medida que a área da bacia aumenta, essa variabilidade tende a minimizar; (iv) Souza, Santos e Kobiyama (2009) utilizaram o SWAT como ferramenta para análise de concessão de outorgas de direito de uso dos recursos hídricos, na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. Os autores classificaram como satisfatório os valores encontrados para a vazão mínima encontrada, evidenciada por um NSE_{log} de 0,72. O estudo também evidenciou, que para bacias hidrográficas com área menor que 100 km² há grande variação da vazão Q_{95} .

Souza e Santos (2013) enfatizam que o modelo hidrológico SWAT pode ser aplicado no estudo do potencial hidrelétrico de bacias hidrográficas, quando se trata de simulações de vazões mínimas remanescentes no recurso hídrico, com a finalidade de calcular o seu respectivo potencial hidroenergético.

Portanto, com base nos estudos anteriormente citados, evidencia-se que o modelo SWAT apresentou resultados satisfatórios com relação à estimativa de vazões mínimas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O material e métodos utilizados neste trabalho estão descritos nas seções que seguem.

3.1 Área de estudo

A BHRC (620,85 km²) localiza-se no sul de Santa Catarina e abrange os municípios de São Bonifácio e São Martinho (Figura 4). As nascentes dessa bacia estão localizadas na Serra Geral, formando com outras quatro bacias o sistema de drenagem da bacia do rio Tubarão e Complexo Lagunar (5.959,97 km²), estando inserida na Região Hidrográfica Sul Catarinense - RH9 (SDMa, 2002).

Essa bacia se destaca pela grande quantidade de pequenas propriedades rurais (com tamanho menor que 20 ha), onde predomina o cultivo de fumo e mandioca (SDMa, 2002).

Também na região da BHRC são desenvolvidas atividades de pecuária, suinocultura, extração mineral, madeireiras, indústrias têxteis e turismo.

Nessa região, grande parte do consumo de energia é proveniente das atividades rurais (42%), seguido do comércio (24%) e demais residências e atividades turísticas (34%) (SDMa, 2002). Essa energia é gerenciada pela Central Elétrica de Santa Catarina SA (CELESC) e cooperativas locais como, Cooperativa de Eletrificação Rural de Armazém (COOPERZÉM) e Cooperativa de Eletrificação Rural de Gravatal (CERGRAL) (SDMa, 2002).

Flórez (2014) ressalta que a geração de energia, por meio de um empreendimento como uma PCH traz benefícios para a região onde o empreendimento será inserido, um deles é a maior disponibilidade de energia elétrica para os consumidores residenciais e industriais, fator que pode proporcionar a atração de grandes indústrias e demais empreendimentos para a região, o que possibilita a geração de empregos e desenvolvimento a médio e longo prazo, como é o caso da região da BHRC.

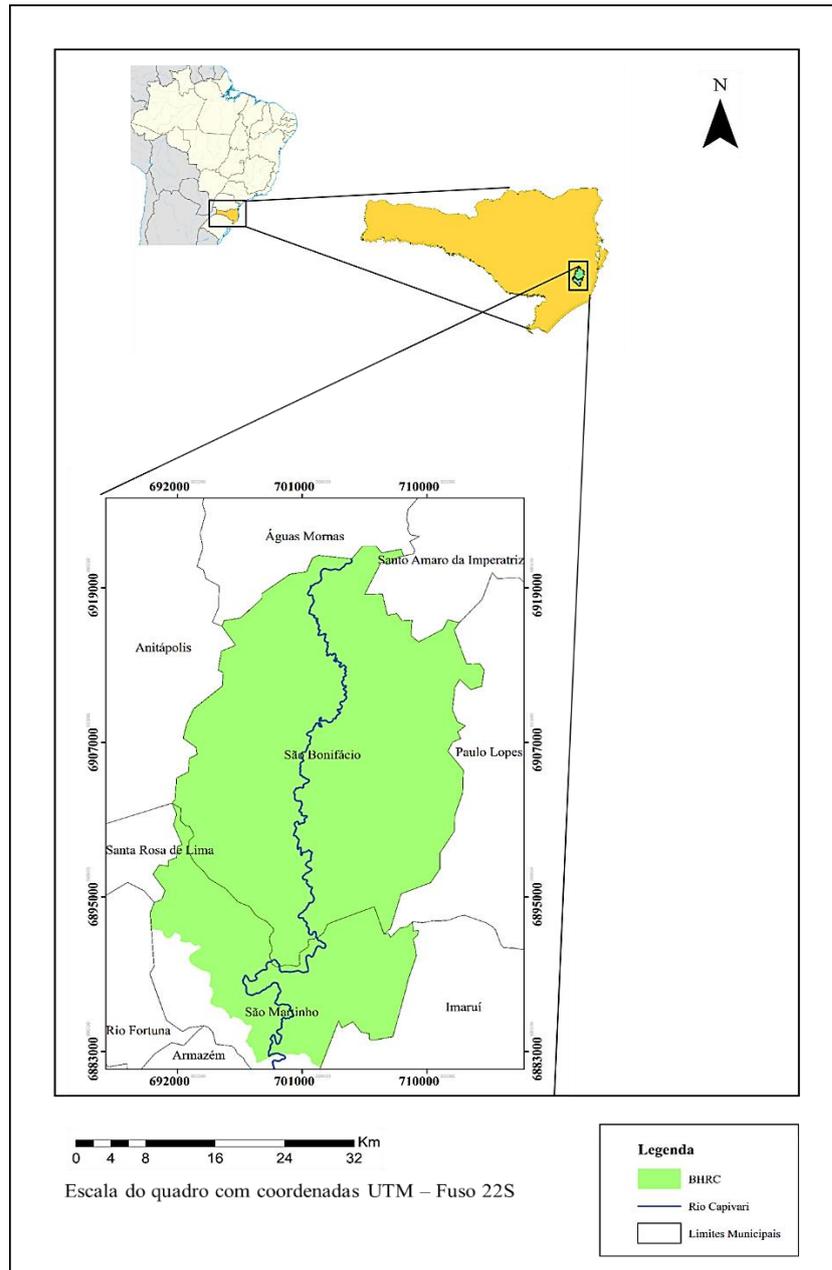


Figura 4 – Localização da bacia hidrográfica do rio Capivari. (Fonte: Autor, 2016)

O clima da região da BHRC, segundo Köppen, é do tipo Cf, ou seja, Mesotérmico Úmido (sem estação seca); e inclui dois subtipos: Cfa – Clima Subtropical Mesotérmico Úmido e verão quente e Cfb – Clima Temperado Mesotérmico Úmido e verão ameno (EPAGRI, 2002).

Segundo o diagnóstico realizado na bacia do rio Tubarão e Complexo Lagunar (SDMb, 1997), há a predominância de rochas graníticas, que fazem parte do embasamento cristalino, rochas sedimentares, vulcânicas e também sedimentos quaternários.

O relevo da região RH 9, da qual a BHRC faz parte é caracterizado por ser fortemente ondulado e montanhoso, com ocorrência de planícies, onde estão localizadas as áreas

urbanizadas (SDMa, 2002). A porção oeste e noroeste dessa região apresentam as cotas mais elevadas (em torno de 1340 m) (SDMb, 1997).

No passado, a vegetação da região predominante, segundo Roberto Klein (1978), era a floresta tropical do litoral e encosta do centro sul, com árvores relativamente baixas de copas largas. Essa região apresenta diversos microclimas e, por consequência, a composição da vegetação é bastante complexa, assim como o tipo de solo. Atualmente, a vegetação é composta por áreas de floresta natural remanescente e “ilhas” de reflorestamento de *pinus* e eucalipto (SDMa, 2002).

A BHRC, de acordo com o mapa de solos de Santa Catarina, na escala 1:250.000, apresenta três tipos de solos: (i) Cambissolo; (ii) Neossolo Litólico e (iii) Argissolo, com predominância do Cambissolo (EMBRAPA, 2004).

O Cambissolo e o Neossolo Litólico compreendem solos minerais, classificados como de bom a moderadamente drenados, provenientes de materiais de origem e composição bastante variáveis. Entretanto, os Neossolo Litólicos são rasos, com espessuras, em geral, inferiores a 0,4 m, enquanto os Cambissolos apresentam profundidades que podem ser superiores a 2 m (EMBRAPA, 2004). Já o Argissolo, desenvolve-se a partir de diversos materiais de origem, pois ocorrem em praticamente todos os tipos de rochas, com exceção das rochas efusivas básicas. Esse solo forma-se em áreas de relevo suave ondulado até forte ondulado, apresentando drenagem moderada, com profundidades que variam entre 0,5 m a 2 m (EMBRAPA, 2004).

3.2 Material

As seções que seguem descrevem o material utilizado neste trabalho.

3.2.1 Estações de monitoramento hidrológico

Para o estudo foram utilizadas séries históricas de dados de chuva, vazão e clima (temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e vento), obtidos, respectivamente de 8 estações pluviométricas, uma estação fluviométrica e uma estação meteorológica (Quadro 3).

As estações pluviométricas e fluviométricas são de responsabilidade da Agência Nacional das Águas (ANA) e monitoradas pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI). Já a estação meteorológica é de responsabilidade do

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e monitorada pela EPAGRI/CIRAM (Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia).

As séries históricas de dados da estação meteorológica foram obtidas por meio do *site* do INMET no BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep> > e as demais séries são provenientes de estações pluviométricas e fluviométrica disponibilizadas *online* no *site* da ANA, por meio do sistema de informações hidrológicas, *Hidroweb* < <http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp> >. Esses dados foram acessados em abril de 2016.

Apresenta-se no Quadro 3 o nome das estações, códigos utilizados pela ANA e INMET, o seu respectivo tipo, a localização e o período das séries históricas utilizadas na simulação sem calibração e com calibração por meio do modelo SWAT. A Figura 5, que segue, representa a localização das estações pluviométricas e fluviométricas na BHRC.

Quadro 3 – Estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológicas utilizadas no modelo SWAT.

Nome	Código	Tipo	Município	Série
Anitápolis	02749027	P	Anitápolis	1987-2015
Anitápolis-Divisa	02749065	P	Anitápolis	1987-2015
Armazém Capivari	02848000	P	Armazém	1987-2015
Paulo Lopes	02748017	P	Paulo Lopes	1987-2015
Santa Rosa de Lima	02849031	P	Santa Rosa de Lima	1987-2015
São Bonifácio	02748018	P	São Bonifácio	1987-2015
São Martinho	02848009	P	São Martinho	1987-2015
São Martinho Jusante	84598002	F	São Martinho	2011-2015
Vargem do Cedro	02848006	P	São Martinho	1987-2015
Urussanga	A814	M	Urussanga	1987-2015

*P = Estação pluviométrica; *F= Estação Fluviométrica; M= Estação Meteorológica.

Fonte: Autor, 2016.

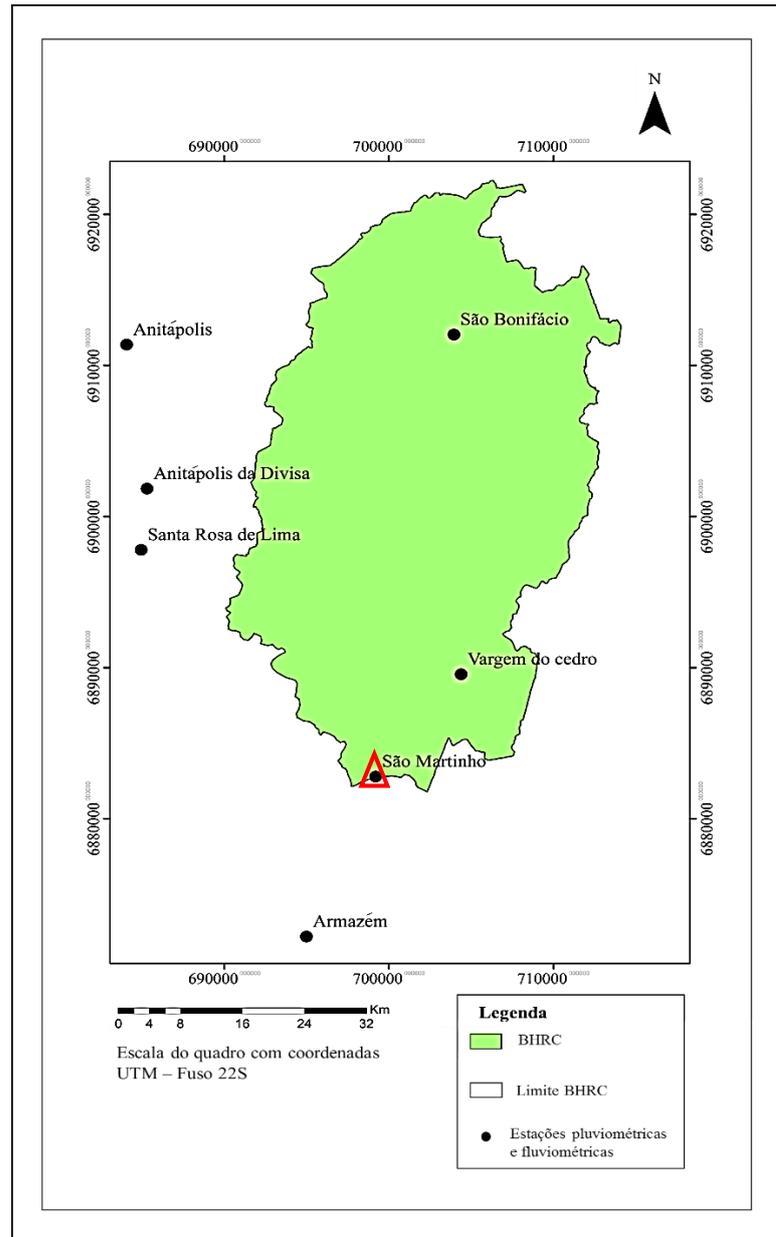


Figura 5 – Localização das estações pluviométricas e fluviométricas na BHRC. (Fonte: Autor, 2016)

3.2.2 Dados tabulares de clima e hidrológicos

O modelo SWAT requer dados tabulares para o gerador climático (dados meteorológicos e pluviométricos) e para calibração do modelo (dados de vazão medidos).

Os dados tabulares de entrada medidos, que são necessários para as simulações por meio do gerador climático do modelo SWAT foram obtidos das estações pluviométricas, fluviométrica e meteorológica (Quadro 3), descrita no item 3.2.1. Esses dados consistiram em valores médios diários de: (i) temperatura mínima e máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$); (ii) precipitação (mm); (iii) umidade relativa do ar (%); (iv) velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e (v) insolação (horas de brilho solar).

Para obter os dados de radiação solar, foi necessário efetuar a conversão dos dados de insolação diária (W.m^{-2}) para radiação solar diária ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$). Esta conversão foi realizada por meio de planilha do programa *Microsoft Excel*, desenvolvida por Daniela Bressani, com base na planilha de François Delobel e fórmulas de referência da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO/ONU) (2009). Este material é gratuito e encontra-se disponível no *site* do SWAT.

Esses dados foram organizados em uma única coluna e salvos como arquivo de texto (*.txt) no *software Notepad++*, que é um editor de código-fonte, disponibilizado gratuitamente pelo *site* < <https://notepad-plus-plus.org/> >. Esse formato de dados é requerido pelo módulo do gerador climático do SWAT.

No entanto, as séries de dados provenientes das estações meteorológicas e pluviométricas nem sempre são completas e, muitas vezes, apresentam longos períodos de falhas, como é o caso das séries de dados adquiridas das estações meteorológica e hidrológicas utilizadas no presente trabalho.

Desta forma, para realizar o devido preenchimento das falhas foi utilizada a ferramenta *Global Weather Generation*, que é disponibilizada no *site* < <http://swat.tamu.edu> >. Essa ferramenta foi desenvolvida pelos Centros Nacionais de Previsão Ambiental (CNPA) e Sistema de Reanálise de Previsões Climáticas (SRPC) dos EUA (NCEP, 2016), e elaborada de maneira que o sistema oceano-atmosfera-terra-superfície do mar seja acoplado e, desse modo, forneça dados tabulares com estimativas de dados climáticos globais.

A ferramenta *Global Weather Generation* necessita como dados de entrada a localização latitude e longitude e a orientação (norte, sul, leste e oeste) do local onde os dados são requeridos (Quadro 4), e como saída gera tabelas com os dados climáticos do local de interesse, já no formato requerido para a entrada no modelo, no período solicitado, sem a presença de falhas.

Destaca-se na Figura 6 mostra o *site* onde a ferramenta está disponível, evidenciando os campos de entrada que devem ser preenchidos.

Utilizou-se neste estudo o período de dados de 1987 à 2014, visto que os dados de 2015 não apresentaram falhas.

Global Weather Data for SWAT

The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) [Climate Forecast System Reanalysis \(CFSR\)](#) was completed over the 36-year period of 1979 through 2014. The CFSR was designed and executed as a global, high resolution, coupled atmosphere-ocean-land surface-sea ice system to provide the best estimate of the state of these coupled domains over this period. The current CFSR will be extended as an operational, real time product into the future.

This website allows you to download daily CFSR data (precipitation, wind, relative humidity, and solar) in SWAT file format for a given location and time period. For more information about CFSR data, please visit our [publications page](#).

Step 1: Select your bounding box

Hold the **Shift** key and drag to select your bounding coordinates on the map. Or, type your latitude/longitude coordinates below. For quick response, bounding coordinates must not exceed **12** decimal degrees latitude and **12** longitude. You may submit a larger area, but it will be subject to approval by an administrator before running and make take several weeks to complete depending on the size and number of years requested.



Step 2: Define your time period for collecting data

Please select a start date no earlier than 1/1/1979 and an end date no later than 7/31/2014.

Start Date	End Date
01/01/1979	07/31/2014

Starting Hour of Day

Hourly data is stored in the database and aggregated to daily based on the starting hour defined below. For example, if you select 6:00 AM, your day on Jan. 1 is defined from this time until 6:00 AM the following day.

12:00 AM

Step 3: Select what data to collect

- Temperature (°C)
- Precipitation (mm)
- Wind (m/s)
- Relative Humidity (fraction)
- Solar (MJ/m²)

Email Address

Confirm Email Address

- Generate SWAT Files
- Generate CSV File

SUBMIT REQUEST



Figura 6 – Recurso online *Global Weather Generation* – SWAT. (Fonte: Autor, 2016)

Quadro 4 – Dados de entrada *Global Weather Generation* – SWAT.

Latitude sul	-28°11'00"
Latitude norte	-27°47'56"
Longitude leste	-48°49'03"
Longitude oeste	-49°04'05"

Fonte: Autor, 2016.

Desse modo, o programa gerou séries de dados diários referentes a 9 estações meteorológicas, que foram posteriormente agregadas ao banco de dados do modelo, para a utilização na simulação para a correção das falhas dos dados tabulares inseridos no gerador climático.

Os dados tabulares de vazão medidos na área de estudo permitem realizar a calibração do modelo, ou seja, o ajuste dos parâmetros de entrada do modelo.

Assim, apenas as médias das vazões mensais, medidas no exutório da bacia do rio Capivari, foram utilizadas para a calibração do modelo. Esses dados foram adquiridos da estação fluviométrica denominada São Martinho Jusante (84598002) descrita anteriormente. A calibração do modelo está detalhadamente apresentada no item 3.6.

Para simular os processos hidrológicos, o modelo SWAT requer também dados tabulares de solo e de uso e cobertura do solo.

Os dados tabulares referentes as características dos solos requeridos pelo SWAT são divididos em duas categorias: i) parâmetros do tipo de solo; e ii) parâmetros da camada do solo, onde a sucinta descrição será apresentada a seguir.

i) Parâmetros do tipo de solo: a) nome do solo; b) número de camadas; c) grupo hidrológico do solo; d) profundidade total (mm); e) fração de porosidade do solo.

ii) Parâmetros de cada camada do solo: profundidade da camada (mm); densidade do solo na camada (g.cm^{-3}); capacidade de água disponível na camada (mm.mm^{-1}); carbono orgânico (%); condutividade hidráulica da camada (mm.h^{-1}); argila (%); silte (%); areia (%); rocha (%); albedo; fator de erodibilidade da camada (K); condutividade elétrica do solo (dS.mm^{-1}); carbonato de cálcio (CaCO_3) (%) e pH.

Os dados relacionados aos solos, como: nome do solo; profundidade (mm); número de camadas; textura; carbono orgânico (%); argila (%); silte (%); areia (%); rocha (%); carbonato de cálcio (CaCO_3) (%) e pH, foram obtidos do levantamento de solos de Santa Catarina, realizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) em 2004.

Os demais dados são relacionados a: fração da porosidade do solo; potencial máximo de fissura do perfil do solo ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$); densidade do solo; capacidade de água disponível; condutividade hidráulica; albedo; e condutividade elétrica do solo foram estimados a partir de Malutta (2010) e Zanin (2015). Já o fator K-USLE foi calculado com base na porcentagem de carbono orgânico; porcentagem de areia, silte e argila.

O grupo hidrológico de cada tipo de solo foi determinado com base no trabalho de Sartori et al. (2005). Os dados de solos da BHRC foram analisados de modo a classificar o grupo hidrológico, conforme as definições que os autores apresentam, as quais correlacionam

as características dos solos e resistência à erosão, dos solos brasileiros. Essa classificação abrange a definição de cada grupo (A, B, C e D), onde prioriza as principais características dos solos que influenciam no escoamento superficial e na erosão, que são representadas pela: profundidade; textura; razão textural entre o horizonte superficial e subsuperficial; e a permeabilidade de cada tipo de solo, que é relacionada a sua porosidade e atividade de argila.

Assim, os solos pertencentes ao grupo hidrológico A são muito profundos (entre 100 e 200 cm, ou mais), com alta taxa de infiltração e grau de resistência e tolerância à erosão; solos porosos com baixo gradiente textural e textura argilosa ou muito argilosa; solos bem drenados ou excessivamente drenados e com argila de atividade baixa (SARTORI et al., 2005). O grupo B é a classificação destinada a solos: profundos (100 a 200 cm), com moderada taxa de infiltração, resistência e tolerância à erosão; textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso; e solos de textura argilosa ou muito argilosa (SARTORI et al., 2005). Ainda segundo os mesmos autores, o grupo hidrológico C abrange os solos com as seguintes características: profundidade de 100 a 200 cm, ou 50 a 100 cm; baixa taxa de infiltração, resistência e tolerância à erosão; gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta; e argila de atividade baixa. Já o grupo hidrológico D é destinado a solos: rasos (profundidade < 50 cm); taxa de infiltração muito baixa, pouquíssima resistência e tolerância a erosão; mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando também mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade; solos argilosos e solos orgânicos (SARTORI et al., 2005).

Quanto aos dados tabulares referentes ao uso e cobertura do solo foram utilizados parâmetros de *default* do modelo SWAT, que se baseiam em formações vegetais características do hemisfério norte. Para esses dados foram atribuídas informações mais generalizadas para cada classe de uso e cobertura do solo.

3.2.3 Softwares

Para a realização do estudo, os seguintes *softwares* foram utilizados para edição dos dados de entrada e simulação do SWAT:

- *ArcGIS 10.3*. Extensões: *Spatial Analyst* v. 10.3 e *3D Analyst* v. 10.3 desenvolvidos pela *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), *Redlands, California*, EUA – Versão teste disponível gratuitamente por meio do *site* em: < <http://www.esri.com/software/arcgis/extensions/spatialanalyst> >;

- Interface *ArcGIS - Soil and Water Assessment Tool* v. 10.3.18 (*ArcSWAT*), desenvolvido pelo *Blackland Research Center Texas Agricultural Experiment Station* e *Agricultural Research Service (USDA)* – disponível gratuitamente por meio do *site* em: <<http://swat.tamu.edu/software/arcsWat/>>.
- *SWAT CUP - SWAT Calibration and Uncertainty Procedures*, ferramenta disponível gratuitamente no *site* <<http://swat.tamu.edu/software/swat-cup/>> para realizar a calibração, e análises de incerteza dos projetos gerados no *SWAT*.

3.2.4 Material cartográfico e imagens de satélite

O *SWAT* requer como material cartográfico de entrada o Modelo Digital de Elevação (MDE), mapa de uso e cobertura do solo e mapa de solos.

Para a construção do MDE foram utilizadas as cartas topográficas digitais (escala 1:50.000), que cobrem a região da BHRC. Essas cartas foram obtidas no *site* da EPAGRI/CIRAM <<http://www.ciram.epagri.sc.gov.br>>.

Para a elaboração do mapa de uso cobertura do solo da BHRC foram utilizadas 4 cenas das imagens *RapidEye*, as quais cobrem toda a área da bacia. As datas das imagens utilizadas foram 12/09/2012 e 10, 17 e 29 de dezembro de 2012. Essas datas foram escolhidas em função da ausência de nuvens nas imagens, uma vez que, esse fator interfere na obtenção das amostras de cada uso e cobertura do solo. Essas imagens são disponibilizadas gratuitamente pelo Geocatálogo do Ministério do Meio Ambiente, no *site* <<http://geocatálogo.mma.gov.br/index.jsp>>.

Já o mapa de solos foi elaborado com base no levantamento de solos, realizado em 2004 pelo EPAGRI/CIRAM, na escala 1:250.000 (EMBRAPA, 2004).

Todos os mapas utilizados como dados de entrada no modelo *SWAT* foram elaborados no software *ArcGIS 10.3* e suas ferramentas de edição.

3.2.5 Banco de dados espaciais

Como dados espaciais de entrada o modelo *SWAT* requer: (i) um mapa de solo da bacia, (ii) um mapa de uso e cobertura do solo, e (iii) um modelo digital de elevação (MDE).

O modelo digital de elevação (MDE) é um dos dados espaciais fundamentais requeridos pelo modelo *SWAT*. Segundo Dornelles e Collischonn (2013) o modelo digital de elevação (MDE), consiste em uma matriz, onde cada elemento contém um valor correspondente à altitude do terreno. Essa forma de armazenar computacionalmente dados topográficos é a mais

utilizada para extrair informações para estudos hidrológicos. O MDE pode ser obtido por interpolação das curvas de nível e pontos cotados obtidos de mapas topográficos digitais, e a sua principal característica é a resolução espacial (tamanho da célula da matriz), que corresponde à área do terreno em unidades reais.

No modelo SWAT, o MDE foi utilizado para extrair informações do relevo e delimitar a bacia hidrográfica. O MDE permite identificar, para cada célula da matriz, qual é a direção preferencial do escoamento superficial da água, admitindo que a água escoar de uma célula para uma das 8 células vizinhas, de acordo com o critério de maior declividade (DORNELLES e COLLISCHONN, 2013). Esse cálculo é repetido para cada célula da matriz. O resultado é uma nova matriz em que cada célula recebe um valor, que é um código de direção do escoamento. Assim, a partir da matriz com os códigos de direção do escoamento é possível delimitar a área da bacia, ou seja, traçar o divisor de água da bacia automaticamente. Desta forma, contando o número de células e sabendo a área real que cada uma representa é possível calcular a área da bacia e o comprimento dos rios.

Para construir o MDE da área de estudo, utilizou-se as curvas de nível e pontos cotados das cartas topográficas digitais e também a rede hidrográfica dos municípios de São Bonifácio, São Martinho, Grão Pará e Anitápolis, na escala 1:50.000, projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), SAD-69 e fuso 22S. Para gerar o MDE utilizou-se o interpolador “*Topo to raster*”, ferramenta integrada no software *ArcGis 10.3*, o qual requerer como dados de entrada: as curvas de nível, pontos cotados, rede hidrográfica e a delimitação da bacia hidrográfica. Essa ferramenta é derivada do *software* ANUDEM, com objetivo de construir um modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado, uma vez que utiliza a rede de rios e os lagos, presentes na área da bacia, em conjunto com as curvas de níveis e pontos cotados, na interpolação dos dados altimétricos (ZANIN, 2015). A delimitação da BHRC foi desenhada com base nas curvas de nível e pontos cotados das cartas topográficas digitais, utilizando a ferramenta de edição no *ArcGIS 10.3*.

Para a correção de falhas (preenchimento de dados) do MDE foi aplicado um filtro, disponível na ferramenta denominada no *ArcGIS 10.3* de “*Fill*”. O MDE final foi gerado na resolução espacial de 30 m.

Quanto ao mapa de uso e cobertura do solo, esse foi elaborado utilizando as imagens do satélite *RapidEye*, que capta imagens de grandes extensões da Terra, com alta resolução espacial (5 m), utilizando 5 bandas espectrais diferentes. Para a elaboração do mapa de uso e cobertura do solo foi utilizada a composição colorida *Red-Green-Blue* (RGB) aplicada para três bandas com as seguintes resoluções espectrais: (i) do vermelho (630 - 685 nm); (ii) do

infravermelho (706 – 850 nm); e (iii) verde (520 – 590 nm). Essa composição permite que as imagens sejam visualizadas em cores naturais, conforme a paisagem real do terreno, o que facilita a obtenção de amostras (polígonos contendo conjuntos de pixels) de cada tipo de uso do solo.

Para o estudo foram definidas 6 classes de uso e cobertura do solo: (i) mata nativa: áreas com floresta ombrófila mista, em diferentes estágios de regeneração; (ii) água: rios, córregos, lagos naturais e artificiais; (iii) pastagem; (iv) reflorestamento de eucalipto; (v) solo exposto: áreas agricultáveis com solo exposto, áreas de assoreamento dos rios e estradas sem pavimentação; e (vi) área urbanizada: áreas urbanizadas ao longo das planícies da região. Esse mapa foi elaborado empregando o método de classificação supervisionada “Máxima Verossimilhança” (*MAXVER*), disponível no *ArcGis 10.3*, o qual calcula a probabilidade estatística de um pixel pertencer a determinada classe de uso e cobertura do solo.

Apesar das imagens de satélite serem de alta resolução (5 m), o mapa final de uso e cobertura do solo foi reamostrado para resolução de 30 metros, a fim de ser realizada a sobreposição (*overlay*) deste com os outros mapas de solo e de declividade, no modelo SWAT.

Para a entrada dos dados de uso do solo no modelo foram utilizadas as classificações correspondentes disponibilizadas no *default* do modelo SWAT, conforme o Quadro 5. Para maiores informações sobre as características de cada classe uso e cobertura do solo utilizada, consultar a teoria do SWAT (ARNOLD et al., 2010).

Quadro 5 – Usos do solo - SWAT.

Uso do solo	Uso do solo - SWAT
Mata nativa	FRTS
Água	WTR
Pastagem	PAST
Reflorestamento	EUCA
Solo exposto	AGRR
Área urbana	URLD

Fonte: Autor, 2016.

Por fim, para simular os processos hidrológicos na bacia foram utilizadas 5 intervalos de classes de declividade, de acordo com Zanin (2015). Os intervalos de classes definidos foram: (i) 0 a 5 (%); (ii) 5 a 15 (%); (iii) 15 a 25 (%); (iv) 25 a 45 (%); (v) de 45 a 9999%.

O mapa de solos da BHRC foi elaborado a partir do mapa de solos da EMBRAPA (2004), cuja escala de detalhamento é de 1:250.000, utilizando a ferramenta de edição no *ArcGIS 10.3*. Na bacia, os principais tipos de solos encontrados foram: Cambissolo, Neossolo Litólico e Argissolo.

3.3 Descrição do modelo SWAT

As simulações hidrológicas realizadas pelo modelo SWAT podem ser divididas em duas fases: a) fase terrestre do ciclo hidrológico; e b) fase de propagação do ciclo hidrológico (MALUTTA, 2012).

A fase terrestre do ciclo hidrológico é dividida em sete componentes: (i) hidrologia; (ii) clima; (iii) sedimentos; (iv) crescimento vegetal; (v) manejo agrícola; (vi) nutrientes; e (vii) pesticidas. Na Figura 7 apresenta-se uma esquematização dessa fase e os seus respectivos fenômenos físicos (LINO, 2009).

Já, a fase de propagação do ciclo hidrológico, é dividida em dois componentes: (i) propagação no canal principal e (ii) propagação no reservatório (LINO, 2009).

No entanto para este trabalho, somente foram abordados os fenômenos da fase terrestre do ciclo hidrológico.

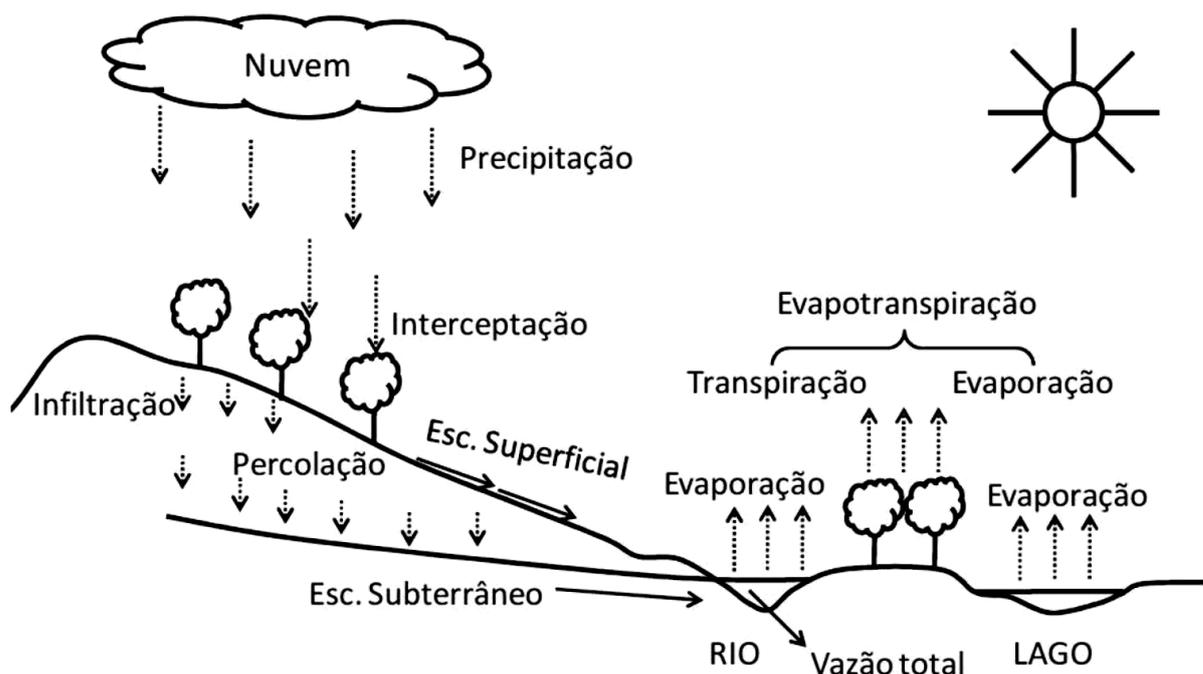


Figura 7 – Fase terrestre do ciclo hidrológico (Fonte: Kobyama et al., 2007)

3.3.1 Fase terrestre do ciclo hidrológico

Nos itens seguintes seguem as equações utilizadas pelo modelo SWAT na fase terrestre do ciclo hidrológico.

3.3.1.1 Hidrologia

O modelo SWAT considera que o equilíbrio hídrico seja o grande responsável por todo o processo hidrossedimentológico que acontece em uma bacia hidrográfica. A equação de ciclo hidrológico utilizada nas simulações do modelo, é baseada na equação do balanço hídrico (Equação 3).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_i - ET_i - q_{lat.i} - q_{ret.i}) \quad (3)$$

Onde SW_t é a quantidade final de água no solo (mm); SW_0 é a quantidade inicial de água no solo (mm); R_{day} é a quantidade de precipitação diária (mm); Q_i é o escoamento superficial (mm); ET_i é a evapotranspiração (mm); $q_{lat.i}$ é o escoamento lateral (mm); $q_{ret.i}$ é o escoamento de retorno (mm); e o índice t corresponde ao período (dias) (NEITSCH et al., 2009).

A seguir, serão apresentadas as equações principais que o modelo utiliza no que concerne à hidrologia do modelo.

3.3.2 Escoamento superficial

O escoamento superficial é o fluxo que ocorre ao longo da superfície inclinada e o mesmo ocorre sempre quando a taxa de aplicação de água no solo excede a taxa de infiltração (NEITSCH et al., 2009).

O modelo SWAT possui dois métodos para a estimativa do escoamento superficial: (i) o procedimento do *Soil Conservation Service* (SCS), denominado Curva Número (CN), correspondente ao default do modelo; e (ii) o método de *Green & Ampt* (CARVALHO, 2014). Para o presente estudo, foi adotado o método CN-SCS (USDA/SCS, 1972) para o cálculo do escoamento superficial.

O método da curva número (Equação 6) é calculado a partir dos valores de precipitação diária. Esse método é um produto relacionado há mais de vinte anos de estudos, que envolveu relações entre a precipitação e o escoamento superficial- (chuva-vazão) - de pequenas bacias

hidrográficas rurais nos Estados Unidos. Além disso, permite estimar o escoamento superficial da bacia hidrográfica conforme os diversos uso da terra, tipos de solos e coberturas vegetais associados, por meio da Equação 4 (CARVALHO, 2014; LINO, 2009; SOUZA, 2011).

$$Q_{surf} = \frac{(P_i - I_a)^2}{(P_i - I_a + S)} \quad (4)$$

Onde Q_{surf} é o escoamento superficial total (mm); P_i é a precipitação total (mm); I_a é a abstração inicial (armazenamento no terreno, interceptação e infiltração de água no solo antes de iniciar o escoamento superficial) e S é o parâmetro de retenção (mm), que varia com o tipo de uso e cobertura vegetal, solo e declividade. O parâmetro S é expresso pela Equação 5.

$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (5)$$

Onde CN é a Curva Número diária (adimensional) e seu valor varia de 1 a 100, dependendo do tipo de solos, condições de uso e cobertura do solo e umidade antecedente. Os valores extremos do CN correspondem à cobertura permeável (1) e cobertura impermeável (100) (CARVALHO, 2014).

O método CN-SCS determina três condições de umidade antecedente: (i) CN_1 : condição seca; (ii) CN_2 : condição de umidade média; e (iii) CN_3 : condição úmida. Os valores tabelados de CN do modelo SWAT encontram-se na condição CN_2 . As Equações (6) e (7) são utilizadas para converter CN_2 em CN_1 e CN_3 , respectivamente (MALUTTA, 2010).

$$CN_1 = \frac{CN_2 - 20 \cdot (100 - CN_2)}{100 - CN_2 + \exp(2.533 - (0,0636 \cdot 100) - CN_2)} \quad (6)$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot [0,00673 \cdot (100 - CN_2)] \quad (7)$$

Segundo recomendações do SCS, as abstrações iniciais (I_a), podem ser aproximadas para $0,2S$. Dessa forma, $P_{diária} > 0,2S$ é condição inicial para que haja escoamento superficial no dia e então utiliza-se as Equações 8 e 9.

$$Q_{surf} = \frac{(P_i - 0,2.S)^2}{(P_i + 0,8.S)} \quad \text{se } P > 0,2.S \quad (8)$$

$$Q_{surf} = 0 \quad \text{se } P \leq 0,2.S \quad (9)$$

3.3.3 Vazão de pico

A vazão de pico é a máxima taxa de escoamento superficial que ocorre em um evento de precipitação. A vazão é um indicador da intensidade da erosão e é utilizada para calcular a perda de sedimento (NEITSCH et al., 2005).

O modelo SWAT calcula a vazão de pico por meio da Equação 10.

$$Q_{pico} = \frac{C \cdot i^* \cdot A}{3,6} \quad (10)$$

Onde Q_{pico} é a vazão de pico ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); C é o coeficiente de escoamento; i^* é a intensidade da precipitação ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); e A é a área da bacia (km^2). O valor 3,6 (adimensional) é um fator de conversão de unidades.

3.3.4 Escoamento subterrâneo

Um aquífero é uma unidade geológica que pode armazenar determinada quantidade de água, sendo capaz de transmiti-la a uma taxa maior o bastante para ser considerada hidrologicamente significativa (NEITSCH et al., 2009).

O modelo SWAT simula os dois tipos de aquífero: (i) raso (não-confinado) e (ii) profundo (confinado). O aquífero raso contribui para o escoamento no canal ou trechos das sub-bacias. Já o aquífero profundo, o modelo apenas assume que o mesmo contribui para o escoamento de água fora da bacia hidrográfica simulada (NEITSCH et al., 2009).

O escoamento de base ou subterrâneo entra no canal somente se a quantidade de água armazenada no aquífero exceder um valor limiar especificado pelo usuário ($aq_{shthr,q}$). A resposta do estado estacionário do escoamento subterrâneo até a recarga é descrito na Equação 11.

$$Q_{gw,i} = \frac{8000 \cdot K_{sat}}{L_{qw}} \cdot h_{wtbl} \quad (11)$$

Onde Q_w é o escoamento subterrâneo no canal principal no dia i (mm); K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada do aquífero (mm.dia^{-1}); L_{gw} é a distância do divisor da bacia do sistema subterrâneo para o canal principal (m); e h_{wtbl} é a altura do lençol freático (m) (MALUTTA, 2010).

O escoamento subterrâneo pode ser calculado de duas maneiras: (i) quando ocorre recarga, e (ii) quando não ocorre recarga.

As fórmulas para o escoamento subterrâneo com recarga estão apresentadas na Equação 12 e 13.

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp[\alpha_{gw} \cdot \Delta t] + w_{rchrq,sh} \cdot (1 - \exp[-\alpha_g \cdot \Delta t]) \quad (12)$$

se $aq_{ch} > aq_{shthr,q}$

$$Q_{gw,i} = 0 \quad \text{se } aq_{ch} \leq aq_{shthr,q} \quad (13)$$

Onde $Q_{gw,i}$ é o escoamento subterrâneo no canal principal no dia i (mm); $Q_{gw,i-1}$ é o escoamento subterrâneo no canal principal no dia $i-1$ (mm); α_{gw} é a constante de recessão de escoamento de base; Δt é o passo de tempo e possui valor igual à 1; $w_{rchrq,sh}$ é a quantidade de água de recarga entrando no aquífero raso no dia i (mm); aq_{oh} é a quantidade de água inicial armazenada no aquífero raso no dia i (mm); e $aq_{shthr,q}$ é o nível limiar de água no aquífero raso para que ocorra contribuição da água subterrânea para o canal principal (mm).

Já para o escoamento subterrâneo, quando não ocorre a recarga do aquífero, as Equações 14 e 15 representam esse processo.

$$Q_{gw} = Q_{gw0} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot t] \quad \text{se } aq_{ch} > aq_{shthr,q} \quad (14)$$

$$Q_{gw,i} = 0 \quad \text{se } aq_{ch} \leq aq_{shthr,q} \quad (15)$$

Onde Q_{gw} é o escoamento subterrâneo no canal principal no tempo t (mm); $Q_{gw,0}$ é o escoamento subterrâneo no canal principal no início da recessão ($t = 0$) (mm); α_{gw} é a constante de recessão de escoamento de base; t é o tempo passado desde o início da recessão (valor igual

à 1); aq_{ch} é a quantidade de água inicial armazenada no aquífero raso no dia i (mm); e $aq_{shthr,q}$ é o nível limiar de água no aquífero raso para que ocorra contribuição da água subterrânea para o canal principal (mm).

3.3.5 Escoamento lateral

O escoamento lateral é significativo em áreas com solos que possuem uma camada superficial com alta condutividade hidráulica seguido de uma camada semi-impermeável ou impermeável (NEITSCH et al., 2009).

O modelo SWAT incorpora um modelo de armazenamento cinemático para o escoamento sub-superficial. Este modelo de armazenamento cinemático é baseado na equação do balanço de massa líquida, onde o volume de controle definido é o segmento em declive (Equação 16).

$$Q_{lat} = 0,024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (16)$$

Onde Q_{lat} é a quantidade de água que escoo sub-superficialmente (mm); $SW_{ly,excess}$ é o volume drenável de água na camada de solo (mm); K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); slp é a declividade média da sub-bacia ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$); ϕ_d é a porosidade drenável da camada de solo ($\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$); e L_{hill} é o comprimento do declive (m).

3.3.6 Percolação

A percolação de água ou transmissão de água (fluxo descendente) ocorre quando se excede a capacidade de campo (reserva de água) de uma camada de solo e a camada abaixo ainda não está saturada. A percolação é calculada para cada camada do perfil de solo e o SWAT usa uma técnica de propagação do armazenamento, combinado com um modelo de fluxo em fendas para simular o escoamento através de cada camada (horizonte) do solo (Equação 17) (NEITSCH et al., 2009).

$$W_{perc,ly} = SW_{ly,excesso} \cdot \left[1 - \left(-\frac{\Delta t}{TT_{perc}} \right) \right] \quad (17)$$

O volume de água disponível para a percolação nas camadas do solo é calculado pelo modelo a partir das Equações 18 e 19.

$$SW_{ly,excesso} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad \text{se } SW_{ly} > FC_{ly} \quad (18)$$

$$SW_{ly,excesso} = 0 \quad \text{se } SW_{ly} \leq FC_{ly} \quad (19)$$

Onde SW_{ly} é o conteúdo de água na camada do solo (mm); e FC_{ly} é o conteúdo de água na camada de solo na capacidade de campo (mm).

O tempo de propagação é específico para cada camada de solo e é calculado pela Equação 20.

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (20)$$

Onde TT_{perc} é o tempo para a percolação (h); SAT_{ly} é a quantidade de água na camada de solo em condições de saturação (mm); FC_{ly} é a água presente na camada de solo em condição de capacidade de campo (mm); e K_{sat} é a condutividade hidráulica para a camada (mm.h^{-1}).

3.3.7 Evapotranspiração

Segundo Neitsch et al. (2009), a evapotranspiração é o conjunto de todos os processos (evaporação, transpiração e sublimação), dos quais a água em estado líquido ou sólido próximo a superfície do solo, torna-se vapor. A evapotranspiração inclui: (a) a evaporação de rios e lagos, (b) evaporação do solo (sem ou com cobertura vegetal), (c) a transpiração das folhas e (d) a evaporação da água interceptada pela vegetação. As evaporações do solo e das plantas são calculadas separadamente. A evaporação do solo é calculada por uma função da evapotranspiração potencial e da área das folhas, equivalentes a uma unidade de resposta hidrológica (URH). A evaporação real da água existente no solo é calculada considerando a profundidade do solo e a quantidade de água no solo.

A evapotranspiração potencial, segundo Pereira et al. (1997) é a quantidade de água que seria utilizada por uma extensa superfície vegetada com grama (altura entre 8 e 15 cm), em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo, e sem restrição hídrica. Neste caso, a evapotranspiração potencial é limitada apenas pelo balanço vertical de energia, isto é, pelas

condições do ambiente local, podendo ser estimada por fórmulas empíricas, desenvolvidas para diversas condições climáticas. Assim, a evapotranspiração é um valor indicativo da demanda evapotranspirativa da atmosfera local em um determinado período.

A contabilização da evapotranspiração é de suma importância na modelagem, visto que se trata de um grande percentual da precipitação que não contribuirá para a vazão no exutório da bacia (perdas de água). A primeira etapa deste processo é a contabilização da água interceptada pela vegetação. Toda essa água é evapotranspirada. O SWAT permite se especifique a quantidade máxima de água que pode ser interceptada pela vegetação, dado um índice de superfície foliar máximo e para uma determinada cobertura vegetal. No modelo a estimativa da evapotranspiração potencial pode ser por meio de três métodos: *Penman-Monteith* (1965), *Hargreaves* (1985) e *Priestley -Taylor* (1972) (NEITSCH et al., 2009).

No presente trabalho foi utilizada a equação de *Penman-Monteith* (1965) apud Neitsch et al.(2009), recomendada pela FAO/ONU, que combina componentes que levam em conta a energia necessária para sustentar a evaporação, a força do mecanismo requerido para remover o vapor d'água e os termos aerodinâmicos e de resistência da superfície. O método de *Penman-Monteith* (Equação 21) requer dados de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento (MONTEITH, 1965, Apud NEITSCH et al., 2009).

$$\lambda E = \frac{\Delta (H_{net} - G) + \rho_{ar} \cdot c_p \cdot \left[\frac{e_z^0 - e_z}{r_a} \right]}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \quad (21)$$

Onde λE é o fluxo de densidade do calor latente ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); E é a altura da taxa de evaporação (mm.d^{-1}); Δ é a declividade da curva de saturação da pressão de vapor com a temperatura; H_{net} é a radiação líquida ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$); G é a densidade de fluxo de calor do solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$); ρ_{ar} é a densidade do ar (kg.m^{-3}); c_p é o calor específico a pressão constante ($\text{MJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$); e_z é a pressão de saturação do vapor no ar na altitude z (kPa); γ é a constante psicrométrica (kPa.°C^{-1}); r_c é a resistência de interceptação vegetal (s.m^{-1}); e r_a é a resistência aerodinâmica (s.m^{-1}).

3.4 Clima

Os parâmetros de clima utilizados pelo gerador climático, referente às estações que foram designadas pelo recurso *Global Weather Data*, para que as falhas de dados fossem corrigidas pelo SWAT estão descritos no Quadro 6 (NEITSCH et al, 2009).

Quadro 6 - Parâmetros mensais requeridos pelo modelo SWAT, para correção de falhas dos dados da estação meteorológica.

WLATITUDE	Latitude da estação meteorológica (graus)
WLONGITUDE	Longitude da estação meteorológica (graus)
WELEVE	Altitude da estação meteorológica (metros)
RAIND_YRS	Número de anos dos dados meteorológicos observados que foram utilizados para calcular o RAIN_HHMAX.
TMPMX	Temperatura máxima nos diferentes meses do ano (°C)
TMPMN	Temperatura mínima nos diferentes meses do ano (°C)
TMPSTDMX	Desvio padrão da máxima temperatura no mês.
TMPSTDMN	Desvio padrão da mínima temperatura no mês.
PCPMM	Média da precipitação no mês (mm).
PCPSTD	Desvio padrão da precipitação no mês (mm.dia ⁻¹).
PCPSKW	Coeficiente de altimetria para a precipitação diária no mês.
PR_W(1)	Probabilidade de dia úmido (com chuva) seguido de um dia seco no mês.
PR_W(2)	Probabilidade de dia úmido seguido de outro dia úmido no mês.
PCPD	Número médio de dias chuvosos no mês.
RAINHHMX	Precipitação máxima no período de 30 minutos no mês (mm).
SOLARV	Radiação solar média diária no mês (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹).
DEWPT	Temperatura do ponto de orvalho médio diário no mês (°C).
WNDV	Velocidade do vento médio diário no mês (m.s ⁻¹).

Fonte: Adaptado MALUTTA, 2010.

3.4.1 Sedimentos

Erosão consiste no desgaste de uma paisagem ao longo do tempo. O desgaste inclui o desprendimento, transporte e deposição das partículas do solo devido às forças erosivas das

gotas de chuva e escoamento superficial de água (NEITSCH et al., 2009). A erosão causada pela chuva e pelo escoamento total na bacia hidrográfica é calculada com a Equação Universal de Perda de Solos Modificada (*Modified Universal Soil Loss Equation*– MUSLE), definida por Williams (1995) (Equação 22) (NEITSCH et al., 2009).

A MUSLE consiste em uma versão modificada da Equação Universal de Perda de Solo (*Universal Soil Loss Equation* - USLE) desenvolvida por Wischmeier e Smith (1965) (NEITSCH et al., 2009). A diferença entre a USLE e a MUSLE é que a primeira estima a erosão média anual bruta em função da energia da precipitação, e a segunda estima em função do escoamento.

$$SED = 11,8. (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{usle} \cdot C_{usle} \cdot P_{usle} \cdot LS_{usle} \cdot CFRG \quad (22)$$

Onde SED é a produção de sedimento (ton.dia^{-1}); Q_{surf} é o volume de escoamento superficial (mm.ha^{-1}); Q_{pico} é a vazão de pico ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$); $area_{urh}$ é a área da unidade de resposta hidrológica (ha); K é o fator de erodibilidade do solo; C é o fator de cobertura e manejo; P é o fator de práticas conservacionistas; LS é o fator topográfico; e $CFRG$ é o fator de fragmento grosseiro. O método desenvolvido por Wichmeier et al. (1971) foi utilizado para calcular o fator erodibilidade (K), conforme descrita na Equação 23 (NEITSCH et al., 2009).

$$K_{usle} = \frac{0,00021. M^{1,14} \cdot (12 - OM) + 3,25 \cdot (C_{soilstr} - 2) + 2,25(C_{perm} - 3)}{100} \quad (23)$$

Onde M é o parâmetro tamanho das partículas; MO é a porcentagem matéria orgânica (%); $C_{soilstr}$ é o código de estrutura do solo utilizado na classificação dos solos; e C_{perm} é a classe de permeabilidade do solo.

O parâmetro tamanho das partículas (M) foi calculado conforme a Equação 24.

$$M = (m_{silte} + m_{areia}) \cdot (100 - m_c) \quad (24)$$

Onde m_{silte} é a porcentagem de silte; m_{areia} é a porcentagem de areia muito fina; e m_c é a porcentagem de argila. A porcentagem matéria orgânica (OM) foi calculada pela Equação 25.

$$MO = 1,72 \cdot orgC \quad (25)$$

Onde *orgC* é a porcentagem de carbono orgânico.

Os valores de $C_{soilstr}$ e C_{perm} são adotados a partir dos Quadros 7 e 8, respectivamente, onde o C_{perm} é baseado na condutividade hidráulica saturada do solo.

Quadro 7 – Classes de $C_{soilstr}$

$C_{soilstr}$	Definição para cada tipo de solo
1	Grânulos muito finos
2	Grânulos finos
3	Grânulos médios ou grossos
4	Grânulos em blocos, placas, prismáticos ou maciços

Fonte: Neitsch et al. (2009)

Quadro 8 – Classes de C_{perm}

C_{perm}	Condutividade hidráulica Saturada ($mm.h^{-1}$)
1	Rápido (> 150)
2	Moderado a rápido (50 - 150)
3	Moderado (50 - 150)
4	Lento a moderado (50 - 150)
5	Lento (1 - 5)
6	Muito lento (<1)

Fonte: Neitsch et al. (2009)

3.5 Procedimentos gerais

A Figura 8 mostra o fluxograma metodológico do presente trabalho para realizar a simulação por meio do modelo SWAT.

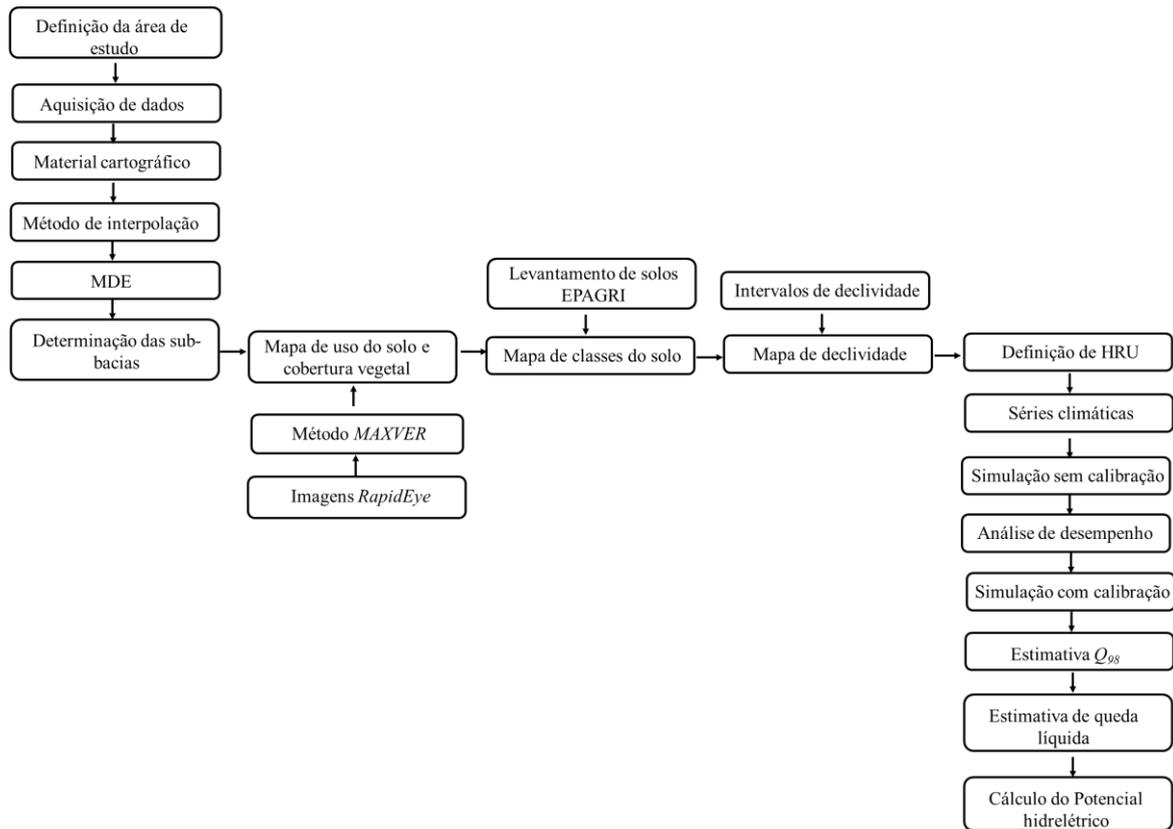


Figura 8 – Fluxograma do estudo da BHRC. (Fonte: Adaptado Machado, 2002).

3.6 Análise do desempenho do SWAT para a simulação hidrológica (chuva-vazão)

Para avaliação do ajuste do modelo SWAT na simulação e calibração das vazões, utilizou-se análises estatísticas e inspeção visual do hietograma e hidrograma das vazões simuladas e medidas.

A análise estatística de modelos hidrológicos pode ser feita por meio do coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE) (NASH e SUTCLIFFE; 1970). Brighenti et al. (2015) ao testaram um método de calibração do modelo SWAT, ressaltam que o NSE indica os ajustes das vazões máximas e, a super ou subestimação geral das vazões simuladas em comparação com as medidas em campo. Os autores destacam que este indicador é comumente utilizado por usuários do SWAT. Contudo, Souza e Santos (2009) salientam que o *Nash-Sutcliffe* prioriza as vazões máximas da série de dados, sendo mais indicado para avaliar o ajuste das vazões mínimas o \log de NSE, uma vez que, valoriza mais essas vazões. Ambos os coeficientes variam de $-\infty$ a 1, sendo 1 indicativo de um ajuste perfeito entre as vazões simuladas e medidas. Segundo Souza e Santos (2013), valores de NSE_{\log} maiores que 0,7 são considerados satisfatórios para análise de vazões mínimas.

O coeficiente *NSE* e o \log do coeficiente são definidos pelas Equações 26 e 27.

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (26)$$

$$NSE_{log} = 1 - \frac{\sum (\text{Log } Q_{sim} - \text{Log } Q_{obs})^2}{\sum (\text{Log } Q_{obs} - \text{Log } \overline{Q_{obs}})^2} \quad (27)$$

Onde Q_{sim} é a vazão simulada, Q_{obs} é a vazão observada e $\overline{Q_{obs}}$ é a média da vazão observada.

Além do NSE_{log} foi utilizado o coeficiente de determinação (R^2) para avaliar o desempenho do modelo. O R^2 representa a associação linear entre os dados medidos e simulados, e varia de 0 a 1. Para Moriasi et al (2007) valores de R^2 maiores que 0,5 são considerados aceitáveis.

Posteriormente a análise de desempenho, foi realizada uma simulação com calibração automática, por meio do *software* SWAT *Calibration and Uncertainty Procedures* (SWATCUP) versão 5.1.6.2, utilizando o *Algoritmo Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI-2). O SWAT CUP é um programa disponibilizado gratuitamente no *site*: < <http://swat.tamu.edu/software/swat-cup/> >, e foi desenvolvido especificamente para a calibração do modelo SWAT. Para mais detalhes sobre o método de calibração automática com o SWAT CUP, consultar Brighenti et al. (2016) e EAWAG (2009).

A calibração consiste no ajuste dos parâmetros do modelo (TUCCI, 2005). Segundo Arnold et al. (2000), no período de calibração as entradas do modelo são variadas até um ajuste aceitável ser alcançado, a fim de que haja coerência entre os dados medidos e simulados pelo modelo. Esse ajuste foi avaliado utilizando o NSE_{log} e o R^2 .

Para a calibração automática dos parâmetros do modelo foram utilizados os dados de vazões diárias e mensais para o período de 2011 a 2015, medidos na estação fluviométrica de São Martinho.

O modelo SWAT, assim como outros modelos hidrológicos, requer um período de aquecimento, visando estabilizar as condições iniciais de umidade do solo (não medidas) para os primeiros anos de simulação (ARNOLD et al., 2012). O período de aquecimento utilizado foi de 01/01/2008 a 31/12/2010, sendo a simulação sem calibração e com calibração, avaliadas para o período restante de 01/01/2011 a 31/12/2015.

3.7 Vazão mínima

A curva de permanência fornece a porcentagem de tempo que a vazão é igualada ou superada, em um determinado período histórico de dados. Este método foi utilizado para a estimar a vazão Q_{98} e a vazão mínima outorgada, seguindo o critério estabelecido pela Portaria da SDS nº 036/10, a qual determina que somente 50% da Q_{98} pode ser utilizada para captação do recurso hídrico.

Desta forma utilizou-se a metodologia proposta por Naghettini e Pinto (2007), para a determinação da curva de permanência. Segundo os autores, a curva pode ser obtida a partir das médias mensais ou anuais dos dados de vazões.

Para a construção da curva de permanência da BHRC foram utilizados dados de vazões médias mensais, referentes ao período de 01/01/2011 a 31/12/2015. Os dados de vazões (Q) foram organizados em ordem decrescente, atribuindo para cada vazão ordenada (Q_m) a sua respectiva ordem de classificação (m). Então, associou-se a cada vazão ordenada Q_m , a sua respectiva frequência ou probabilidade empírica de ser igualada ou superada $P(Q \geq Q_m)$, que foi estimada pela razão $(m.N^{-1})$ (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Os valores obtidos permitem a elaboração de uma tabela ou gráfico, os quais relacionam os valores de vazão e com a respectiva probabilidade desses valores serem igualados ou superados, no período de dados analisado. Dessa maneira, foi possível identificar o valor de vazão correspondente a 98% do tempo (Q_{98}) da série de dados utilizados, para obter a Q_{98} da BHRC na seção de interesse (exutório).

3.8 Determinação da queda líquida

Para determinar o aproveitamento hidrelétrico da BHRC foi obtida a altura de queda líquida, calculada pela diferença entre a altura da queda bruta e perdas hidráulicas. Sendo adotado um valor de 5% de perdas, devido a aduções em túnel/canal, conforme ELETROBRAS, (2000). A queda bruta foi calculada pela Equação 28.

$$H_{liq} = H_{bruta} - 0,05 \cdot H_{bruta} \quad (28)$$

A altura de queda bruta (H) é dada em função dos níveis d'água a montante e jusante, ou seja, é representada pela diferença de altura (cotas) entre os níveis de água de tomada de água do eixo da turbina (ELETROBRAS, 1985).

A altura de queda bruta foi obtida no exutório da BHRC utilizando o MDE, por meio do *software ArcGis 10.3*.

3.9 Determinação do potencial hidrelétrico

Para a determinação do potencial hidrelétrico da BHRC foram utilizadas as Equações (1) e (2), nas quais foram substituídos os valores das variáveis μ e F_c , sugeridos pela Eletrobras (2000) resultando nas Equações 29 e 30.

$$EF_e = \frac{0,85 \cdot 9,81 \cdot Q_{98} \cdot H_{liq} \cdot 1000}{1000} \quad (29)$$

$$Pot = \frac{EF_e}{0,55} \quad (30)$$

Dessa maneira, o potencial hidrelétrico da BHRC foi estimado e então pode-se verificar e caracterizar a pequena central hidrelétrica, conforme apresentado no Quadro 2, no item 2.1.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, os resultados serão apresentados e discutidos por meio de dados tabulares, mapas e gráficos.

4.1 Dados espaciais da BHRC

O modelo SWAT requer a entrada de dados físicos da bacia na forma espacializada, sendo o primeiro deles o MDE, a partir do qual são gerados os parâmetros relacionados ao relevo da bacia como a declividade e comprimento de encosta, onde é feita a delimitação das bacia e sub-bacias e determinado a direção de fluxo, assim como o fluxo acumulado. Já, os outros dados consistiram no mapa de uso e cobertura do solo e de tipos de solo. Esses resultados estão descritos nos itens que seguem abaixo.

4.1.1 Modelo digital de elevação

O resultado do MDE foi o mapa hipsométrico da bacia do rio Capivari (Figura 9), com resolução espacial de 30 m, no qual observa-se que a altitude máxima é de 1.250,87 m e a mínima de 39,97 m (próximo ao exutório da bacia). Já a declividade média da bacia, obtida pelo modelo SWAT foi de 548,92 m.

A distribuição da declividade da sub-bacia 93 (exutório) pode ser observada no Quadro 9, onde verifica-se que o relevo é bastante acidentado, segundo a classificação da EMBRAPA (2006), que qualifica o relevo considerando a suscetibilidade dos solos em relação à erosão hídrica. Com base nesta classificação observa-se que na sub-bacia na sub-bacia 93, o relevo varia de suave-ondulado (21,02%), ondulado (23,97%) e forte ondulado (31,24%).

Segundo a EMBRAPA (2006) um relevo suave ondulado caracteriza-se por uma topografia pouco movimentada, constituída por um conjunto de colinas (elevações de altitudes relativas até 50 m e de 50 a 100 m, respectivamente). Os relevos ondulados, possuem também uma topografia pouco movimentada e colinas, apresentando declives moderados. Já o relevo forte ondulado apresenta uma topografia movimentada, formada por morros (elevações de 50 a 100 m e de 100 a 200 m de altitudes relativas, respectivamente), com declives fortes.

Assim, verifica-se que na sub-bacia 93 o relevo favorece a velocidade do escoamento superficial da água, uma vez que predomina as classes de relevo ondulado e fortemente ondulado, que juntos representam 55,21% da totalidade da área.

Quadro 9 - Classes de declividade da sub-bacia 93

Classe de declividade (%)	Área (km²)	Área (%)	Relevo
0-5	0,88	17,29	Plano
5-15	1,07	21,02	Suavemente ondulado
15-25	1,22	23,97	Ondulado
25-45	1,59	31,24	Fortemente ondulado
45-9999	0,33	6,48	Escarpado

Fonte: Autor, 2016 (2006)

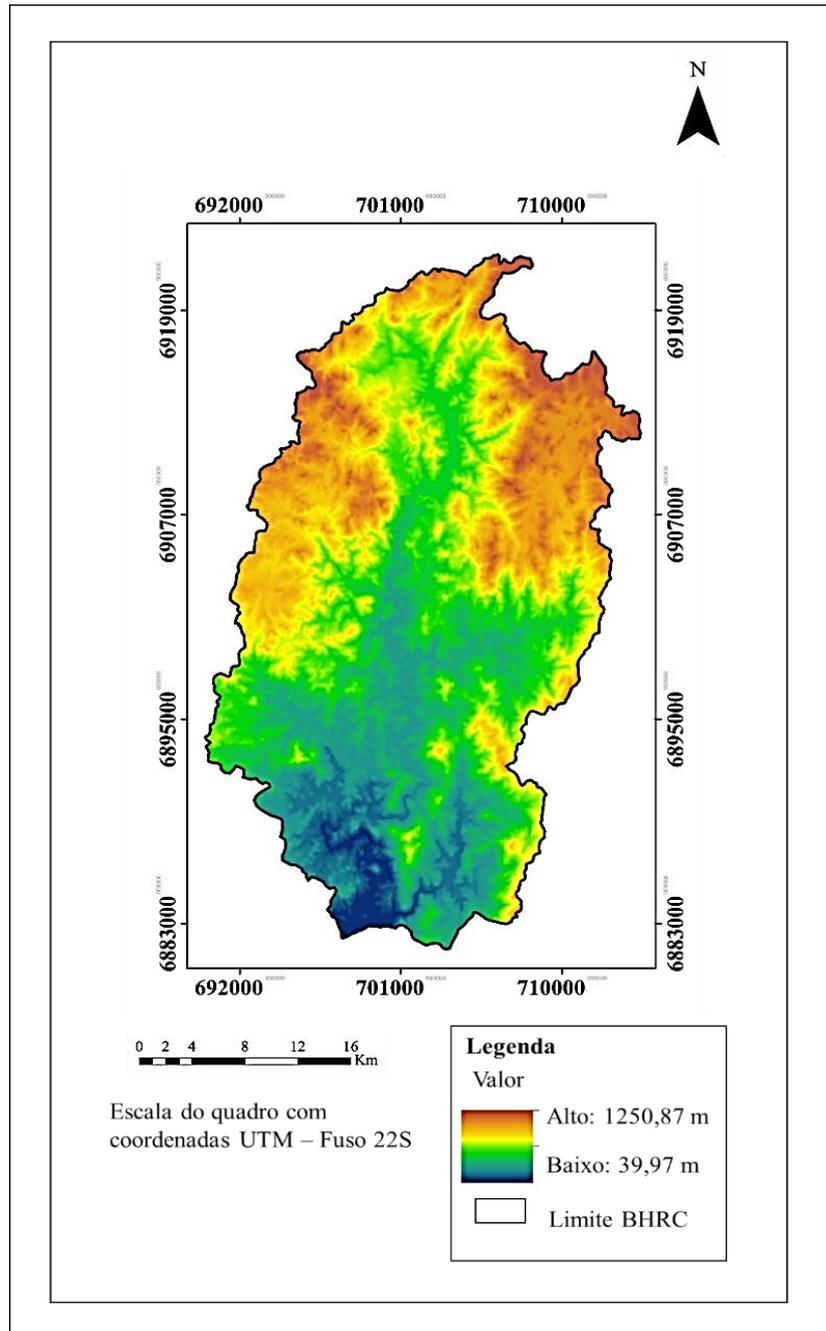


Figura 9 – Modelo digital de elevação da BHRC. (Fonte: Autor, 2016)

4.1.2 Mapa de uso do solo e cobertura vegetal

A classificação automática supervisionada aplicada nas imagens *RapidEye*, obtidas em 12 de setembro de 2012 e 10, 17 e 29 de dezembro de 2012, permitiu identificar 6 classes de uso e cobertura do solo da bacia do rio Capivari: i) mata nativa; ii) água; iii) pastagem; iv) reflorestamento; v) solo exposto; e vi) área urbana, conforme mostra a Figura 10 e Tabela 2.

Na Tabela 2 verifica-se que, na BHRC o uso predominante é Floresta Ombrófila Mista (FRST), representando 57,67% da área total, seguido de pastagem (PAST) e o reflorestamento

(EUC). Considerando a época de tomada das imagens (primavera e início do verão), as áreas de cultivos agrícolas estavam em época de preparo do solo, sendo consideradas como área de solo exposto, representando 5,5% da área da BHRC.

Na Tabela 2, apresenta-se as classes de uso e cobertura do solo e suas respectivas áreas (km²) e porcentagens que cada uso do solo ocupa na BHRC.

Tabela 2 – Porcentagens e áreas de cada classe de uso do solo na BHRC.

Uso do solo e cobertura vegetal	Área (%)	Área (km²)
Mata nativa	55,67	345,63
Água	0,16	0,99
Pastagem	23,16	143,8
Reflorestamento	15,15	94,06
Solo exposto	5,5	34,15
Área urbana	0,36	2,23
Total	100	620,85

Fonte: Autor, 2016.

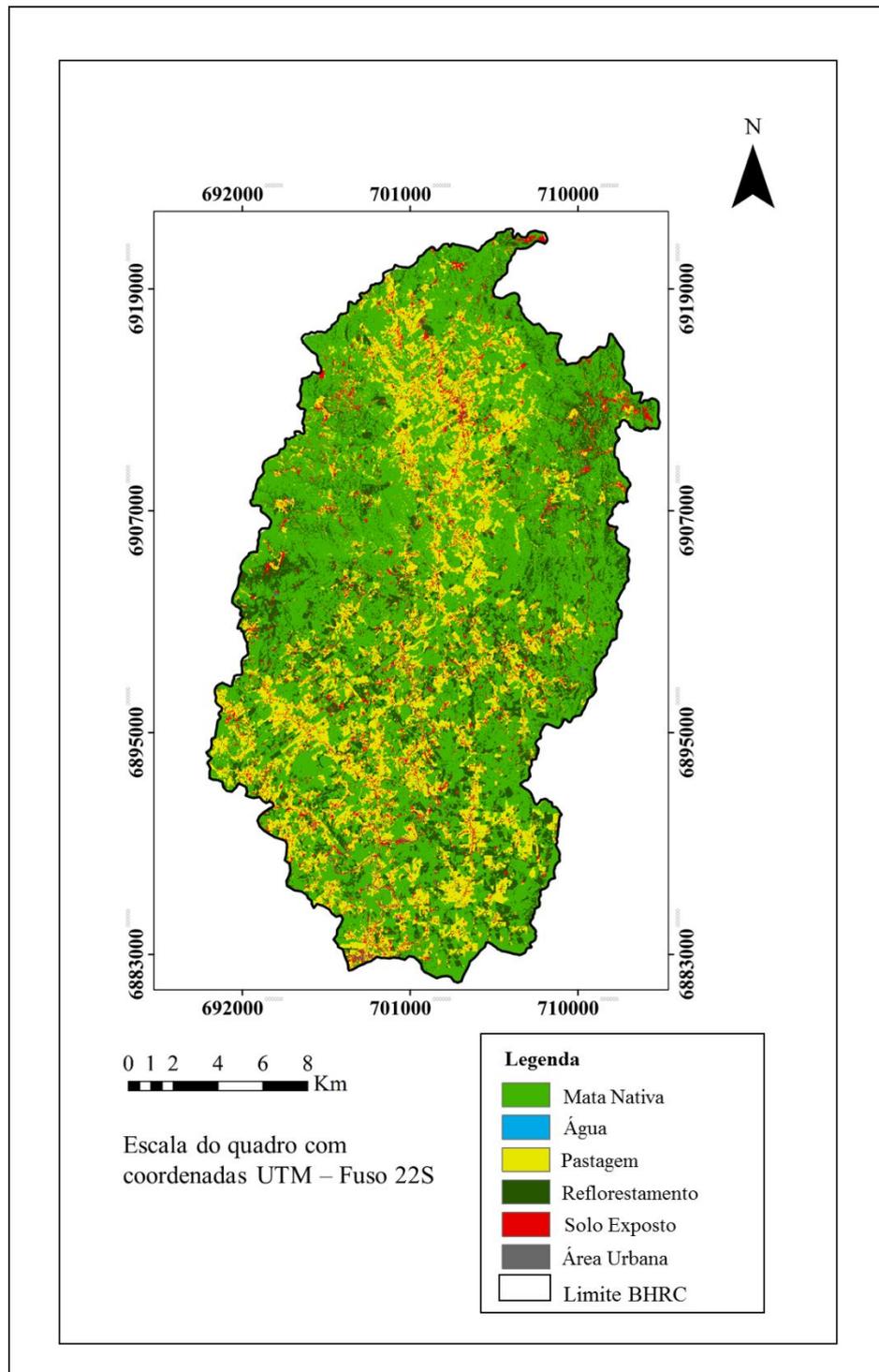


Figura 10 – Uso do solo da BHRC (Fonte: Autor, 2016)

4.1.3 Mapa de solos

Os solos da bacia do rio Capivari (Figura 11) foram classificados, conforme a classificação brasileira de solos (EMBRAPA, 2004). Levando em consideração que a escala de mapeamento utilizada foi de 1:250.000, foram encontrados 3 tipos de solos (Tabela 3).

Na Tabela 3 observa-se que na BHRC o Cambissolo e o Neossolo Litólico são as classes pedológicas predominantes, representando 82,46% e 12,19%, respectivamente. Sendo a classe de Argissolo a menos representativa (5,5%).

Tabela 3 – Porcentagens e áreas de cada tipo de solo na BHRC.

Tipo de solo	Área (%)	Área (Km²)
Cambissolo	82,46	511,95
Neossolo Litólico	12,19	75,68
Argissolo	5,35	33,21
Total	100	620,85

Fonte: Autor, 2016.

O modelo SWAT utiliza a definição do *Natural Resource Conseration Service* (NRSC) (NRSC, 2007) com relação aos grupos hidrológicos dos solos, o qual considera que um grupo é formado por solos que possuem similaridade de potencial de escoamento superficial, nas mesmas condições de tormenta (chuva intensa) e de cobertura do solo.

No entanto, no presente trabalho utilizou-se a metodologia desenvolvida por Sartori et al. (2005), similar a do NRSC, a qual define o grupo hidrológico para solos brasileiros. Com base nos parâmetros de solos descritos no item 3.2.2 foram identificados 3 grupos hidrológicos de solos para a BHRC, conforme a Tabela 4. Assim, pode-se dizer que na BHRC ocorrem solos profundos (100 a 200 cm), com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância de perdas por erosão (grupo B); solos com profundidade entre 100 a 200 cm ou 50 a 100 cm, que possuem baixa taxa de infiltração, resistência e tolerância a perdas por erosão (grupo C); e solos rasos (profundidade < 50 cm) baixa taxa de infiltração, pouca resistência e tolerância à erosão (grupo D).

Tabela 4 – Classificação do grupo hidrológico dos solos da BHRC.

Tipo de solo	Grupo hidrológico
Argissolo	B
Cambissolo	C
Neossolo Litólico	D

Fonte: adaptado de Sartori et al. (2005).

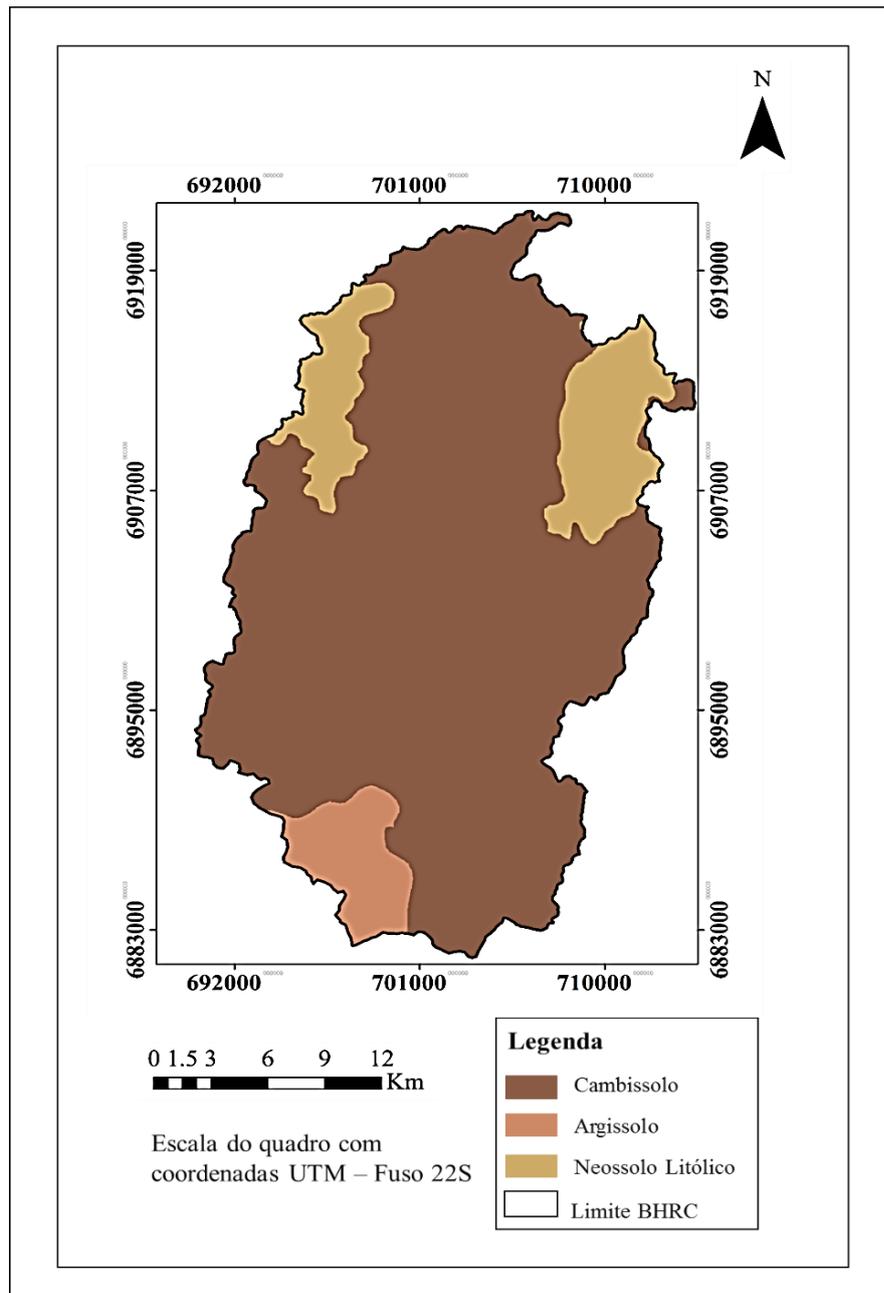


Figura 11 – Solos da BHRC. (Fonte: Autor, 2016)

4.2 Dados tabulares

Segue abaixo os resultados tabulares do modelo SWAT referentes ao clima da BHRC.

4.2.1 Clima

O gerador climático do SWAT, após correção das falhas nos dados de entrada, para o período 1987 a 2015, medidos nas estações pluviométricas e meteorológica, resultou nos dados apresentados nas Tabelas 5 e 6, cuja descrição de cada parâmetro está presente no item 3.4.

Tabela 5 -Valores dos parâmetros mensais para a estação meteorológica utilizada nas simulações no modelo SWAT.

Mês	TMPMX (°C)	TMPMN (°C)	TMPSTDMN	TMPSTDMX
Janeiro	27,33	17,30	4,76	3,39
Fevereiro	27,00	17,47	4,09	3,06
Março	26,30	16,38	4,51	3,75
Abril	24,12	14,48	4,19	4,16
Mai	20,76	11,28	4,32	4,30
Junho	19,64	10,10	4,66	4,58
Julho	19,28	9,59	5,22	4,86
Agosto	20,90	10,80	5,74	4,44
Setembro	21,02	11,39	5,53	4,25
Outubro	22,89	13,47	4,95	3,56
Novembro	24,79	14,48	4,99	3,76
Dezembro	26,90	16,16	4,72	3,55

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 6 -Valores dos parâmetros mensais para a estação meteorológica utilizada nas simulações no modelo SWAT.

Mês	PCPMM (mm)	PCPSTD (mm.dia⁻¹)	PCPD
Janeiro	231,00	11,76	3,36
Fevereiro	207,00	10,41	2,88
Março	149,90	8,38	3,81
Abril	118,80	10,26	6,09
Mai	145,90	12,17	4,03
Junho	124,30	10,32	4,40
Julho	126,20	9,65	3,53
Agosto	114,50	9,97	4,49
Setembro	170,80	13,52	4,95
Outubro	166,60	11,50	5,19
Novembro	154,80	11,28	5,27
Dezembro	141,20	8,34	3,55

Fonte: Autor, 2016.

Com relação às médias mensais de temperaturas, verificou-se que as maiores médias de máxima temperatura (TMPMX) ocorreram nos meses de dezembro a março. Já as menores

médias mínimas de temperaturas (TMPMN) ocorreram nos meses de junho a agosto. Os meses relacionados a cada variável apresentada, correspondem ao período de verão e inverno da região sul do Brasil.

Nas Tabelas 5 e 6 observa-se que as maiores médias mensais de precipitações (PCPMM) ocorreram nos meses de janeiro e fevereiro e, também no período de setembro a novembro (primavera). Já as menores, ocorreram nos meses de junho a agosto.

4.3 Modelagem hidrológica - SWAT

Os critérios adotados para a definição de sub-bacias e URH's e respectivos resultados estão no Quadro 10.

No modelo SWAT para a geração do escoamento superficial foi utilizado o método SCS (USDA/SCS, 1972). Já, para o cálculo da evapotranspiração foi utilizada o método *Penman-Monteith* (MONTEITH, 1965; ALLEN, 1986; ALLEN et al., 1989). Os demais processos foram calculados utilizando as equações de *default* do SWAT.

A partir do MDE o modelo calculou as sub-bacias, com a área mínima de representação de 346 ha. Essa área foi a que melhor representou os rios da bacia, quando comparada com a rede de drenagem representada pelas cartas topográficas, na escala de 1:50.000. Com base na área mínima o modelo delimitou um total de 93 sub-bacias. Na sub-bacia 93 encontra-se a seção de medição (exutório) de vazão da BHRC (Figura 12).

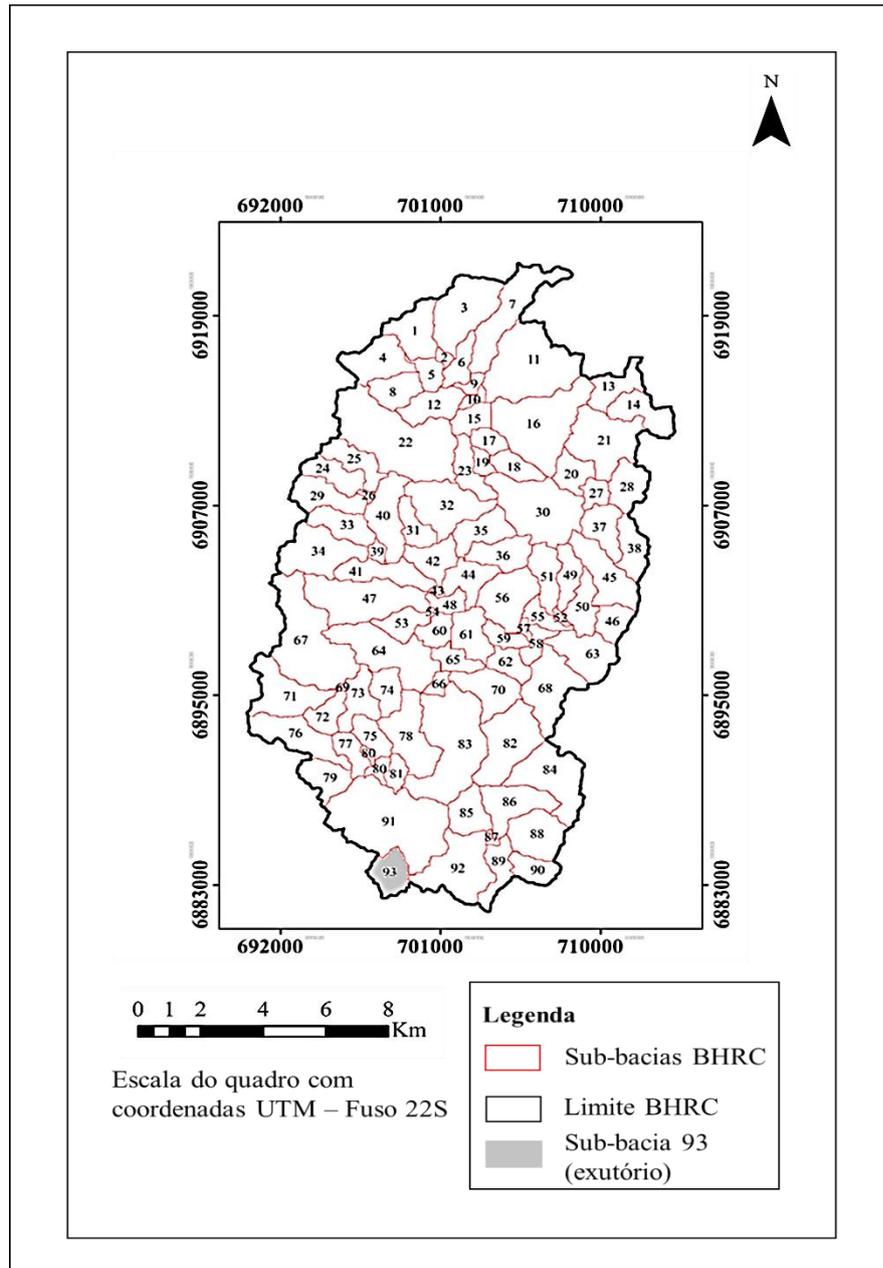


Figura 12 – Sub-bacias da BHRC. (Fonte: Autor, 2016)

Após a delimitação das sub-bacias, o modelo sobrepôs os mapas de solo, uso e cobertura do solo e declividade. Com base na sobreposição dos mapas foram definidas as URH's, adotando o critério de que as áreas de uso e cobertura de solo, declividade e tipo de solo com menos de 10% fossem desconsideradas, adotando neste caso a característica predominante, resultando em 1236 URH's.

As URH's são áreas homogêneas com relação ao uso e cobertura do solo, tipo de solo e declividade e, assim, a evapotranspiração e o escoamento superficial são estimados separadamente para cada uma delas. Desta forma, os cálculos tornam-se mais precisos e ocorre a melhora da descrição do balanço hídrico da bacia (ARNOLD et al., 2012).

Quadro 10 – Critérios e resultados para geração de sub-bacias e URH's

Área acumulada para hidrografia (km²)	620,85	
Intervalo de classes de declividade (%)	0 – 5	
	5 – 15	
	15 – 25	
	25 – 45	
	45 – 9999	
Limiar para URH's	Uso do solo	10%
	Tipo do solo	10%
	Declividade	10%
Número de sub-bacias	93	
Número de URH's	1236	

Fonte: Autor, 2016.

4.4 Calibração do modelo SWAT

Como mencionado anteriormente, o modelo SWAT requer um período de aquecimento. Desta forma, para realizar a modelagem hidrológica no passo de tempo mensal o presente trabalho adotou um período de aquecimento do modelo de 3 anos (2008 a 2010), assim as condições iniciais de umidade do solo (não medidas) para os primeiros anos de simulação são ajustadas (ARNOLD et al., 2012). Após o aquecimento foi realizada uma simulação inicial (sem calibração) e comparada com os dados medidos no exutório da sub-bacia 93, para analisar se as vazões mínimas mensais simuladas estavam coerentes.

A Figura 13 mostra que a simulação sem calibração já apresentou um resultado coerente com os dados medidos. Entretanto, nesta simulação obteve-se um NSE_{log} de 0,41, classificado como “insatisfatório”, segundo Souza e Santos (2013).

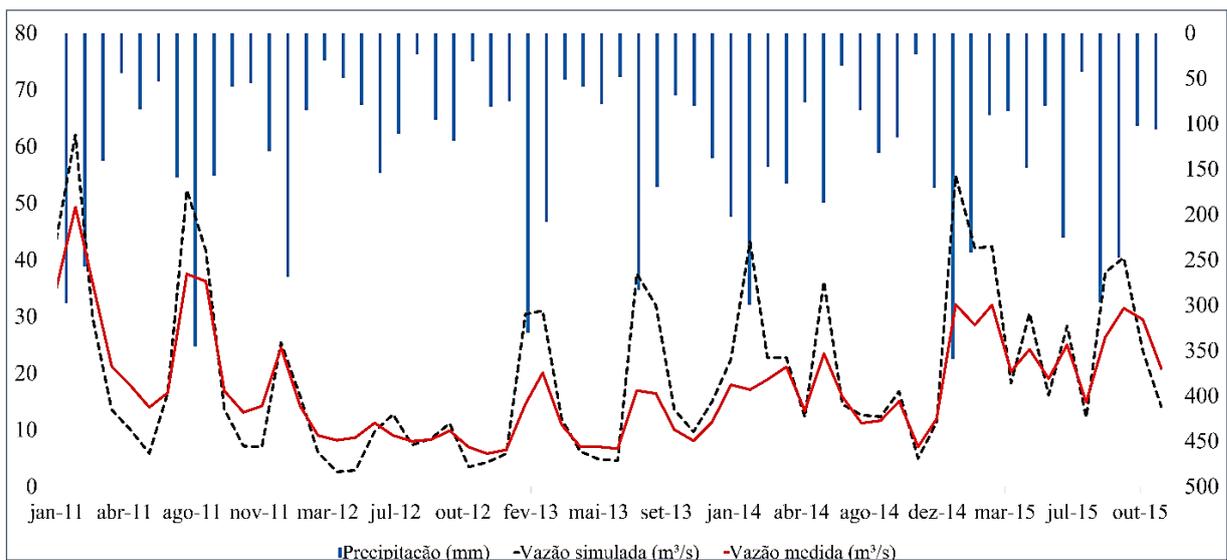


Figura 13- Hietograma e hidrograma das vazões simuladas (sem calibração) e medidas no período de 2011 a 2015. (Fonte: Autor, 2016).

Na Figura 13, apesar do NSE_{log} ser insatisfatório, observa-se que o modelo está correspondendo aos picos de vazões máximas e mínimas, com relação a chuva (hietograma), na maior parte do tempo simulado. No entanto, observa-se que nas vazões mínimas o modelo subestima e nas máximas superestima os valores de vazões médias mensais. Adicionalmente, analisando as vazões médias mensais, para os períodos de novembro a março de 2011, julho a dezembro de 2014 e junho a agosto de 2015, constatou-se que houve um maior ajuste entre os dados medidos.

Com isso, buscando uma melhor a resposta do modelo foi realizada uma calibração automática no *software* SWATCUP, utilizando um novo período de dados de vazões medidas (01/01/2008 a 31/12/2015). Para tanto, foram definidos os parâmetros mais sensíveis para calibração referentes às vazões médias mensais, tomando como base os estudos realizados por Brighenti, Bonumá e Chaffe (2015), Neitsch et al. (2009), Souza (2011) e Zanin (2015) para bacias de Santa Catarina. Com isso, para o presente estudo foram definidos 13 parâmetros, conforme Quadro 11. A descrição sucinta desses parâmetros estão relacionadas abaixo. No entanto, para maiores detalhes consultar Nietsch et al. (2009).

Quadro 11 – Parâmetros calibrados do modelo SWAT

Parâmetro	Definição	Unidade
<i>Alpha_Bf</i>	Constante de recessão do escoamento de base	dias
<i>CN2</i>	Curva número	adimensional
<i>Esco</i>	Coefficiente de compensação da evaporação do solo	Adimensional
<i>Gw_Delay</i>	Tempo de recarga do aquífero	dias
<i>Gw_Revap</i>	Coefficiente que controla o fluxo de água da zona saturada para a não saturada	adimensional
<i>Gwqmn</i>	Profundidade do aquífero raso para escoamento de base	mm
<i>Rchrg_dp</i>	Fração de percolação do aquífero profundo	adimensional
<i>Revapmn</i>	Percolação de água par ao aquífero profundo (mm)	mm
<i>HRU_slope</i>	Declividade média de cada HRU	$m.m^{-1}$
<i>Ssubbsn</i>	Comprimento da vertente	m
<i>Sol_K</i>	Condutividade hidráulica saturada	$mm.hr^{-1}$
<i>Sol_Z</i>	Profundidade do solo	mm
<i>Sol_Awc</i>	Controla a quantidade de água disponível nas camadas de solo	$mm.hr^{-1}$

Fonte: Autor, 2016.

- O parâmetro *Alpha_Bf* possui importância com relação às vazões mínimas, devido a relação direta com as recessões do hidrograma.
- A curva número (*CN2*) é uma função da permeabilidade do solo, uso do solo e condições antecedentes de umidade no solo. Este parâmetro está relacionado com a infiltração e o

escoamento superficial, que influenciam na quantidade de água calculada no exutório da bacia.

- O parâmetro Gw_Delay é influenciado pela dinâmica da água e responsável por controlar o tempo de recarga do aquífero e relaciona-se com o escoamento de base, sendo assim, importante na calibração de vazões mínimas.
- O Gw_Revap controla o fluxo de água da zona saturada (aquífero) para a zona não saturada do solo, onde influencia a dinâmica da água subterrânea na bacia e também possui relação com as vazões mínimas.
- O comprimento médio da encosta, de cada URH ($Slsbbsn$) tem influência na taxa de pico do escoamento, escoamento superficial e também na produção de sedimentos.
- O Sol_Awc controla a quantidade de água disponível nas camadas de solo para a extração das plantas, sendo estimada pela diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha. Este parâmetro tem relação com os processos de percolação, evaporação e dinâmica da água subterrânea na bacia.
- A condutividade hidráulica saturada é controlada pelo parâmetro Sol_K , que é capaz de fornecer informações sobre o movimento da água no solo. A condutividade hidráulica influencia os processos de percolação, fluxo lateral e dinâmica da água subterrânea.
- O parâmetro HRU_Slope tem influência sobre a taxa de escoamento de pico, fluxo lateral, produção de sedimentos e escoamento superficial.
- O parâmetro $Gwqmn$ corresponde ao limite entre o escoamento de base e escoamento subterrâneo no aquífero, que possui relação com as variáveis Gw_Revap e $Rchr_dp$, onde correspondem, respectivamente, ao movimento de água do aquífero superficial para a zona não saturada e fração da percolação que se direciona para o escoamento subterrâneo.
- A variável Sol_z têm influência sobre a taxa de armazenamento de água no solo, que se reverterá em água para vegetação e escoamento de base, que por sua vez, influenciará na quantidade de água disponível no solo, para que ocorra o escoamento superficial.

Com a calibração automática dos parâmetros acima mencionados, o valor de NSE_{log} (Quadro 12), passou de 0,41 para 0,85, apresentando um aumento de 107,32%, mostrando que os resultados calibrados refletem melhor a realidade dos parâmetros físicos da BHRC utilizados como dados de entrada do modelo.

Esse resultado pode ser considerado “satisfatório”, segundo Souza e Santos (2013), que em estudo realizado para avaliar as vazões mínimas na bacia do Altíssimo rio Negro, norte de Santa Catarina, com o modelo SWAT, encontraram um NSE_{log} de 0,76.

Quadro 12 - Coeficientes de análise de vazões mensais no período de 2011 a 2015.

Parâmetro	Dados mensais	
	Simulação inicial	Simulação com calibração automática
$Q_{média}$ ($m^3.s^{-1}$)	20,14	19,61
NSE_{log}	0,41	0,85
R^2	0,77	0,89

Fonte: Autor, 2016.

Observa-se também no Quadro 12, as vazões médias referentes a todo o período simulado (2011 a 2015). Essas vazões apresentam valores consideravelmente próximos a média das vazões medidas no exutório da BHRC (sub-bacia 93), com o valor de $17,6 m^3.s^{-1}$.

Na Figura 14, observa-se que após calibração, os picos de vazões mensais máximas e mínimas (no exutório da BHRC) permaneceram coerentes. Adicionalmente, os dados de vazões médias foram subestimados pelo modelo no período de janeiro a maio de 2011 e outubro a dezembro de 2015. Apesar deste fato, percebe-se que nos períodos de recessões, as vazões foram representadas de forma coerente e satisfatória, evidenciadas por um NSE_{log} de 0,85.

Destaca-se ainda, que os melhores resultados foram obtidos no período de maio a dezembro de 2011 e outubro a dezembro de 2012.

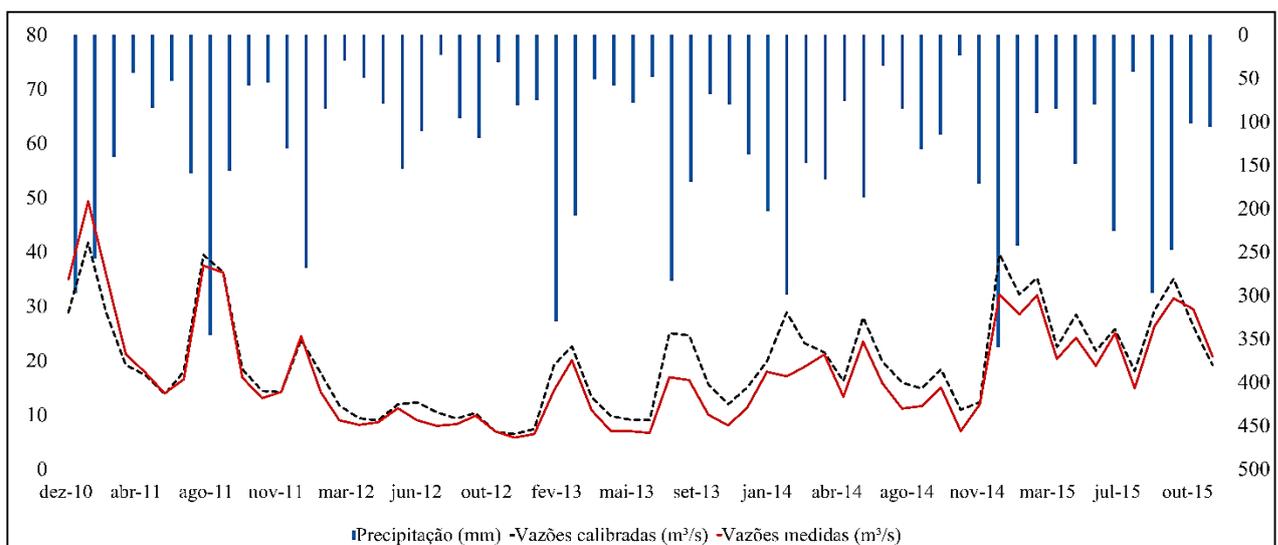


Figura 14- Hietograma e hidrograma das vazões simuladas (com calibração) e medidas no período de 2011 a 2015. (Fonte: Autor, 2016).

As Figuras 15 e 16 mostram a dispersão dos dados analisadas por meio do coeficiente de determinação (R^2) na BHRC, para o período de 2011 a 2015.

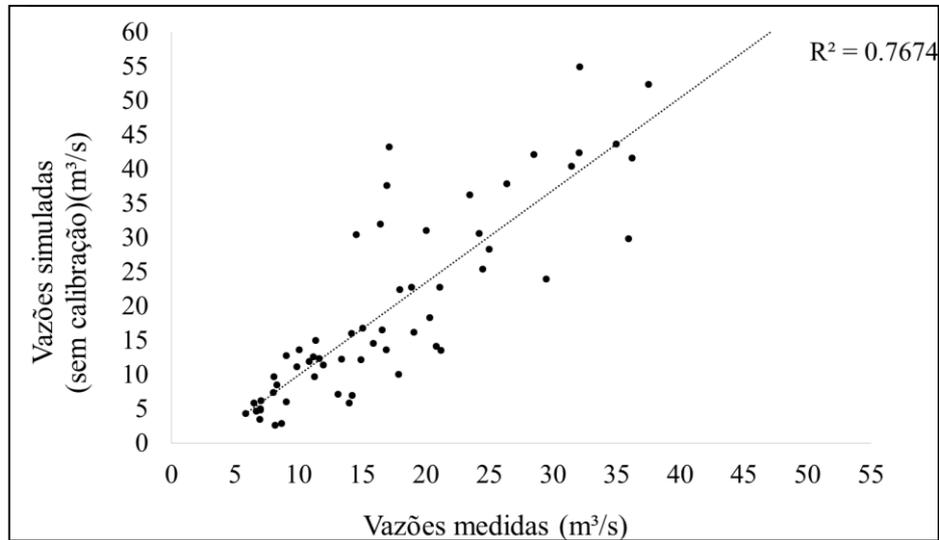


Figura 15- Coeficiente de determinação para os dados simulados (Fonte: Autor, 2016)

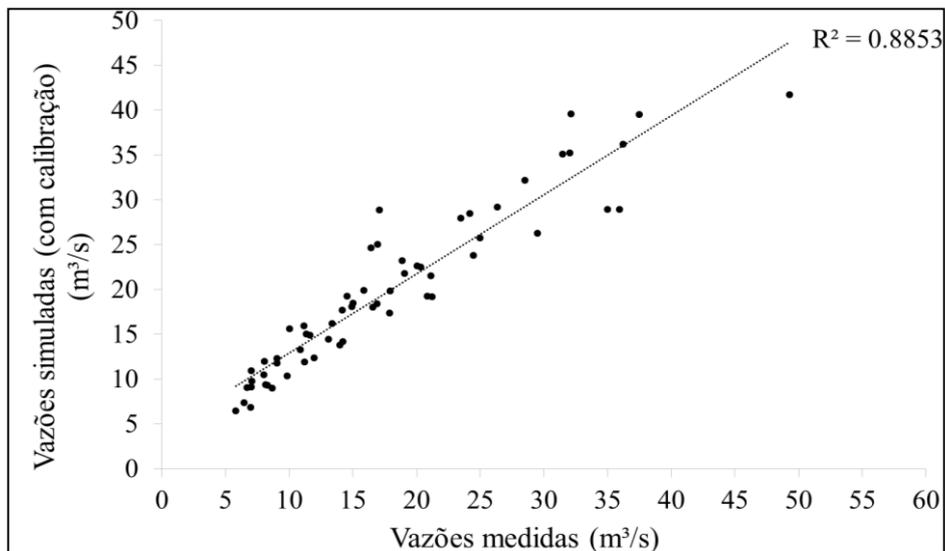


Figura 16- Coeficiente de determinação para os dados simulados (com calibração) (Fonte: Autor, 2016)

Na Figura 15, verifica-se que a série de vazões simuladas, quando comparada à série de vazões medidas, apresentou maior dispersão nos valores de vazões mais altos, justificando os picos medidos no hietograma da Figura 13. No geral, para vazões de até $30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, o modelo apresentou a tendência de subestimar as vazões.

Analisando a Figura 16, observa-se uma menor dispersão dos dados de vazões médias mensais, mostrando que o os dados simulados pelo modelo se ajustaram melhor aos dados medidos.

Os valores de R^2 apresentam-se aceitáveis para ambos os dados simulados (sem calibração) e simulados (com calibração), conforme Moriasi et al. (2007), que considera como satisfatório valores de coeficiente de $R^2 > 0,50$.

4.6 Vazão mínima no exutório da bacia e potencial hidrelétrico

A vazão mínima (Q_{98}) foi estimada por meio da curva de permanência construída a partir das vazões médias mensais simuladas (com calibração) para o período de 01/01/2011 a 31/12/2015. Assim, a Figura 17 apresenta a curva de permanência no exutório da BHRC (sub-bacia 93).

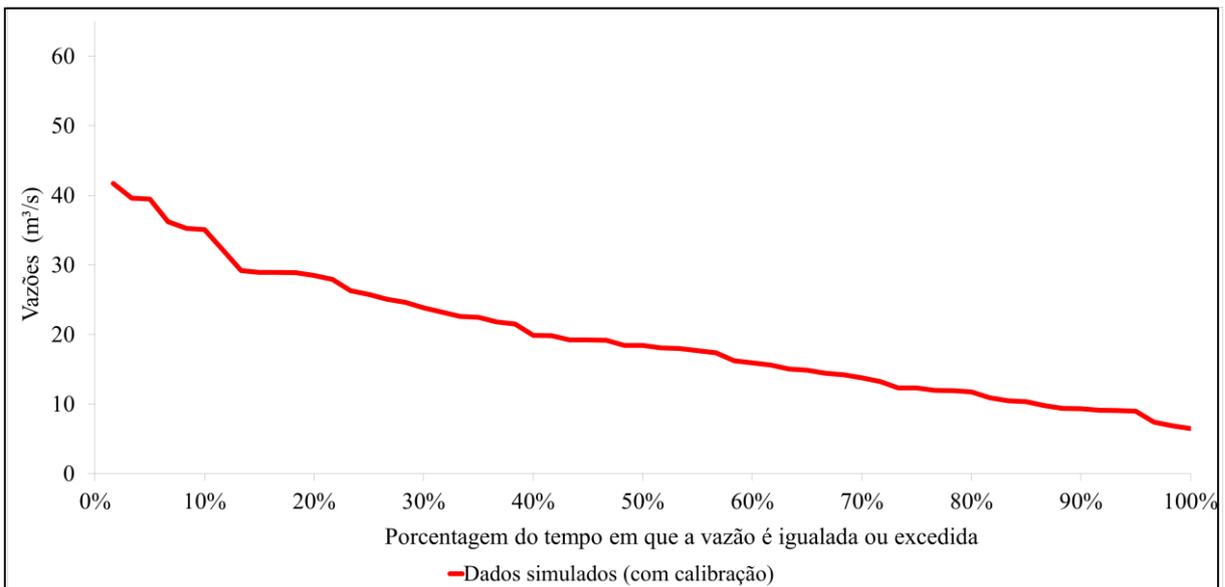


Figura 17- Curvas de permanência das vazões simuladas (com calibração) (Fonte: Autor, 2016)

Analisando a Figura 16 observa-se que o valor da vazão Q_{98} é de $6,87 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e a vazão mínima outorgável para aproveitamento hidrelétrico, segundo a Portaria 036/08/SC, corresponde a 50% desse valor, ou seja, a vazão mínima para a estimativa do cálculo do potencial hidrelétrico aproveitável da BHRC foi de $3,43 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Com base nisso, obteve-se o potencial hidrelétrico da bacia, estimado a partir das Equações 29 e 30, nas quais foram utilizados os parâmetros apresentados no Quadro 13.

Quadro 13 – Parâmetros utilizados para a estimativa de potencial hidrelétrico da BHRC.

Parâmetro	Valor	Unidade
ρ	1000	kg.m ⁻³
μ	0,85	adimensional
Vazão mínima	3,43	m ³ .s ⁻¹
H_{bruta}	7,05	m
H_{liq}	6,7	m
EF_e	0,19	MW
F_c	0,55	adimensional

Fonte: Autor, 2016.

Por fim, o potencial hidrelétrico estimado para a BHRC, com o modelo SWAT, foi de 0,35 MW. Esse valor associado à altura de queda líquida de 6,7 m, caracteriza o empreendimento passível de ser instalado, como uma mini central hidrelétrica de baixa queda ($H_d < 20$ m), conforme o Quadro 2, apresentado no item 2.1.

5 CONCLUSÃO

Visando compreender a vazão mínima, o presente estudo modelou a dinâmica da água na bacia hidrográfica do rio Capivari (Santa Catarina) com o modelo SWAT.

Nas condições em que foram realizadas o presente estudo, conclui-se que o modelo SWAT permitiu modelar a vazão mínima da área de estudo a partir dos dados de entrada requeridos (clima, precipitação e características físicas da bacia), no período de tempo adotado (2008 a 2015), apresentando um bom desempenho, nas simulações das vazões mínimas com calibração automática utilizando o SWAT CUP, evidenciado por um NSE_{log} de 0,85, e um R^2 de 0,88, considerado satisfatório.

A simulação do SWAT resultou na vazão mínima para aproveitamento hidrelétrico de 3,43 m³.s⁻¹, no exutório da bacia (sub-bacia 93). Com base na vazão outorgável e queda líquida do local (obtida a partir do MDE) foi possível verificar que o potencial aproveitável da BHRC é de 0,35 MW, caracterizando o empreendimento passível de ser instalado, como uma mini central hidrelétrica de baixa queda, conforme Eletrobras (2000).

Para trabalhos futuros, recomenda-se realizar a validação do modelo para um período de dados diferente dos utilizados para o aquecimento e calibração do modelo, a fim de verificar se o mesmo permite a regionalização das vazões mínimas e, com isso, verificar a vazão mínima

em outras sub-bacias, a fim de determinar o potencial de aproveitamento hidrelétrico, uma vez que a queda d'água bruta, uso do solo e características do solo variam de uma região para outra nas demais sub-bacias embutidas na BHRC.

Adicionalmente, sugere-se que se faça uma simulação de cenários futuros de uso do solo, considerando reservatórios de acumulação de água, destinados ao aproveitamento hidrelétrico, de modo a avaliar os impactos dos mesmos sobre os recursos hídricos das bacias hidrográficas a jusante dos mesmos.

ANALYSIS OF THE LOW FLOW OF A HYDROGRAPHIC WATERSHED WITH SWAT MODEL FOR CHARACTERIZATION OF HYDROELECTRIC POTENTIAL

ABSTRACT

The low flow of a water resource is one of the fundamental variables for the study of the hydroelectric use of a given region. However, their estimation over a long period of time is a difficult task, depends on numerous factors and environmental variables, related to topography, geology, land use, climate, soils, among others. However, variable measurement is often costly, and it is not always possible to cover an entire area of interest, which in this case is considered a river watershed as the unit of analysis. Hydrological models are tools that allow a representation of the actual system of a river watershed. However, this is not the case for a telecommunications company and a group of telecommunications operators, in order to understand and represent the behavior of the river watershed and to provide conditions different from those observed. Hydrological models for forecasting, analysis of climate effects and changes in land use, verification of water availability, as well as support for decision making on water resources management and management. The objective of this study was to evaluate the low flow with the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model in order to verify the hydroelectric potential of the Capivari river watershed (BHRC) (620.85 km²), Between latitudes 27°48'03 "S at 28°11'13" S and longitudes 48 ° 55'52 "W at 49 ° 04'29" W, in the south of the state of Santa Catarina. SWAT allows to simulate different physical processes in non-instrumented watersheds, and was used to evaluate a minimum flow (Q_{98}) in the BHRC. As simulations SWAT were not performed in monthly time intervals, with no period from 01/01/2008 to 12/31/2015. For the calculation of model performance, the monthly low flow data, the measured de minimis measurements, the BHRC monitoring section, the hydrograph visual inspection medium and the hyrogram, the Nash-Sutcliffe (NSE_{log}) E coefficient Coefficient of determination (R^2). In the simulation with calibration, the result obtained for NSE_{log} was 0.85, with R^2 of 0.89. For Moriasi et al. (2007) values of R^2 greater than 0.5 are considered acceptable and for Souza (2009) NSE_{log} values greater than 0.71 are considered satisfactory for analysis of minimum flows, thus evidencing, the SWAT model can be used for this type of Study at the BHRC. In this way, a minimum resource flow and an estimated hydroelectric potential were obtained for a watershed measuring section of 0.35 MW.

Key Words: low flow, SWAT model, hydroelectric potential.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G. **A Penman for all seasons**. J. Irrig. and Drain Engineering, ASCE. 1986.
- ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; BURMAN, R.D. **Operational estimates of evapotranspiration**. Agron. 1989.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução 673**: Estabelece os requisitos e procedimentos para a obtenção de outorga de autorização para exploração de aproveitamento de potencial hidráulico com características de Pequena Central Hidrelétrica – PCH. 2015.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil 3. Ed.** Brasília: ANEEL, 2008. 236p.
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R S.; WILLIAMS, J. R. **Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development**. Journal of the American Water Resources Association, v.34, p.73-89, 1998.
- ARNOLD, J. G.; MUTTIAH, R. S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P. M. **Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river watershed**. Journal of Hydrology, v.227, p.21-40, 2000.
- ARNOLD, J. G.; FOHRER, N. **SWAT 2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling**. Hydrological Processes, v.19, p.563-572, 2005.
- ARNOLD, J.G.; KINIRY J.R.; SRINIVASAN R.; WILLIAMS J.R.; HANEY E.B.; NEITSCH A.L. **Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation Version 2009**. Texas A&m University System: Texas Resources Institute, 2010.
- 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**. ASABE, v. 55(4): 1491-1508, May 2012.
- BIGa, Banco de Informação da Geração. **Capacidade de Geração do Brasil 2016**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 16 ago. 2016.
- BIGb, Banco de Informação da Geração. **Capacidade de Geração no Estado 2016**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/CapacidadeEstado.cfm?cmbEstados=SC:SANTA%20CATARINA>>. Acesso em: 16 ago. 2016.
- BRASIL, **Decreto - lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Poder Executivo, Brasília, DF. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm>. Acesso em: 24 set. 2016.

BRASIL, **Decreto - lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Poder Executivo, Brasília, DF. Disponível em: < www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm >. Acesso em: 24 set. 2016.

BRASIL, **Resolução nº 129, de 26 de setembro de 2011**. Estabelece diretrizes gerais para a definição de vazões mínimas remanescentes. Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH. Disponível em: < www.cnrh.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1 >. Acesso em: 24 set. 2016.

BRASIL, **Portaria nº 035, de 12 de novembro de 2007**. Estabelece os procedimentos técnicos e administrativos para a emissão da declaração de reserva de disponibilidade hídrica e de outorga para o uso de potencial de energia hidráulica para aproveitamentos hidrelétricos em rios de domínio do estado de Santa Catarina e dá outras providências. Disponível em: < http://www.sirhesc.sds.sc.gov.br/sirhsc/conteudo_visualizar_dinamico.jsp?idEmpresa=12&idMenu=716&idMenuPai=333 >. Acesso em: 24 set. 2016.

BRASIL, **Portaria nº 36, de 29 de julho de 2008**. Estabelece os critérios de natureza técnica para outorga de direito de uso de recursos hídricos para captação de água superficial, em rios de domínio do Estado de Santa Catarina e dá outras providências. Disponível em: < [http://www.sirhesc.sds.sc.gov.br/sirhesc/conteudo_visualizar_dinamico.jsp?idEmpresa=12&idMenu=717&idMenuPai=333](http://www.sirhesc.sds.sc.gov.br/sirhsc/conteudo_visualizar_dinamico.jsp?idEmpresa=12&idMenu=717&idMenuPai=333) >. Acesso em: 24 set. 2016.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. **Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica Catarinense**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH vol. 21 n.1 Porto Alegre jan./mar. 2016 p. 53 – 64, 20015.

BONUMÁ, N.B.; CORSEUIL, C. W.; KOBAYAMA, M.; ZANIN, P.R.; CORREA, F. **Estimativa do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica com o modelo SWAT**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, nov. 2013.

BORTOLOTTI, N. L. **Avaliação do escoamento superficial e da produção de sedimentos na bacia do rio Cunha, Município de Rio dos Cedros, Santa Catarina, com o modelo SWAT**. 2011. 102 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

BRESSANI, D. **Planilha Excel para conversão de dados de insolação em radiação**, baseada em: FAO Drainage and Irrigation Paper No. 56, Smith, 1992 e Linacre, 1992.

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

CARVALHO, F. H. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do cerrado brasileiro**. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. **Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p.111-124, dez. 2007.

DORNELLES, F.; COLLISCHONN, W. **Hidrologia para engenharias e ciências ambientais Volume: 1**. Porto Alegre: ABRH, 2013.

EAWAG. SWAT-CUP. **Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology**. [S.l.: s.n.], 2009. Disponível em: <www.eawag.ch/organisation/abteilungen/siam/software/swat/index_EN>. Acesso em: 3 out. 2016.

ELETROBRAS. **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Centrais Hidrelétricas Brasileiras S.A. - Eletrobras, 2000.

ELETROBRAS. **Manual de Inventário Hidrelétrico e Bacias Hidrográficas**. Grupo Eletrobras e Ministério de Minas e Energia (MMA), 2007.

ELETROBRAS. **Manual de microcentrais hidrelétricas**. Grupo Eletrobras e Ministério de Minas e Energia (MMA), 1985.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Solos do estado de Santa Catarina**, 2004.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 2006.

FLÓREZ, R. O. **Pequenas Centrais Hidrelétricas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

GASSMAN P. W.; REYES M.; GREEN C.; ARNOLD J. G. **The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions**. Trans ASABE, 2007; 50(4): 1211–50.

GASSMAN P. W.; SADEGHI A. M.; SRINIVASAN R. **Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights**. J Environ Qual, 2014; 43(1): 1–8.

IEAa, International Energy Agency. **Energy Technology Perspectives 2014**. 2014. Disponível em: <<http://www.iea.org/etp/etp2014/>>. Acesso em: 16 ago. 2016.

GUITARRARA, G. B. **Estimativa de vazão para implantação de micro-centrais hidrelétricas com utilização do SIG**. 2012. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012.

IEAb, International Energy Agency. **Technology Roadmap: Hydropower 2012**. Disponível em: <<https://www.iea.org/roadmaps/>>. Acesso em: 16 ago. 2016.

KLEIN, R. **Mapa Fitogeográfico da Região de Santa Catarina**. Sudesul, Fatma e Hbr, SC, 1978.

KOBIYAMA, M.; CHECCHIA, T.; CORSEUIL, C.W.; LINO, J.F.L.; LOPES, N.H.Y.; GRISON, F.; CHAFFE, P.L.B.; MALUTTA, S.; RIBAS JUNIOR, U.; LANGA, R.; BASSO, S. *Forest hydrology project* (UFSC–MOBASA) for waterresources management in Rio Negrinho City, Santa Catarina, Brazil. **Changes in Water Resources Systems: Methodologies to Maintain Water Security and Ensure Integrated Management**, Wellington: IAHS, 2007. p. 250-257.

KOBIYAMA, M. MOTA, A.A.; CORSEUIL, C.W. **Recursos hídricos e Saneamento**. Curitiba: Ed. Organic Trading, 2008. 160p.

LINO J. F. L.; CORSEUIL, C. W.; KOBIYAMA, M.; MALUTTA, S.; UDA, P. K.; BORTOLOTTI, N. L.; SANTOS, I. **Análise da vazão da bacia hidrográfica do Rio Preto com o modelo SWAT**. XVIII Simpósio Brasileiro de Recurso Hídrico, 2009.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 154 f. Agronomia – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MALUTTA, S. **Aplicação do modelo SWAT na bacia do Rio Negrinho**. 2010. 97 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MARTINS, C. A. S.; ULIANA, E. M.; SILVA, J. G. F.; CAMARA, G. R.; REIS, E. F. **Curva de permanência das vazões locais da bacia hidrográfica do Rio São Mateus – ES**. Encontro Latino Americano de Iniciação Científica XI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, Vale do Paraíba, 2013.

Ministério de Minas e Energia (MME). **Manual de inventário hidrelétrico de bacias hidrográficas**. Rio de Janeiro: E-papers, 2007.

Ministério de Minas e Energia (MME). **Plano Nacional de Energia 2030** / Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2007.

MORAES, J. M.; SCHULER, A. E.; GUANDIQUE, M. E. G.; MILDE, L. C. E.; GROppo, J. D.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 61-70, 2003.

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**. p. 885-900. 2007.

National Centers for Environmental Prediction (NCEP). **Global Weather Data for SWAT**. Disponível em < <http://globalweather.tamu.edu/>>. Acesso em 15 de maio de 2016.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. E. **River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles**. J. Hydrol.v. 10, n. 3, 1970.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM- Serviço Geológico do Brasil, 2007. 552 p.

NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (NRCS). **National Engineering Handbook**. United States Department of Agriculture, 2007.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS GRASSLAND, J.R., Soil and water research laboratory. **Soil and Water Assessment Tool theoretical Documentation Version 2009**. Agricultural Research Service Blackland Research Center – Texas Agrilife Research. Texas A&M University System, 2009.

PANDOLFO, C.; BRAGA, H. J.; SILVA JR, V. P. da; MASSIGNAM, A. M., PEREIRA, E. S.; THOMÉ, V. M. R.; VALCI, F.V. **Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: EPAGRI, 2002. CD-Rom.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**, Guaíba, Ed. Agropecuária Ltda, 2902478p.

RICARDO, M. **Transposição de dados hidrológicos para a determinação da vazão de projeto de micro e minicentrais hidrelétricas: estudo de caso**. Artigos Técnicos – PCH notícias e SHP News ed. 28, Itajubá, p.14-18, ago. 2006.

SANTOS, S. S.; PIVETTA, G.; GASTALDINI, M. C. C. **Curva de permanência das vazões diárias da bacia hidrográfica Cancela - Tamandaí, Santa Maria - RS**. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília - Df, nov. 2015.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. **Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação**. Rbrh – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 4, p.5-18, out. 2005.

SCHREIBER, G.P. **Usinas Hidrelétricas**. São Paulo, Edgar Blucher; Rio de Janeiro, ENGEVIX, 1977.

SDMa, Secretaria do Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do rio Tubarão e Complexo Lagunar**. Florianópolis, 2002.

SDMb, Secretaria do Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. **Diagnóstico da bacia do rio Tubarão e Complexo Lagunar**. Florianópolis, 1997.

SILVEIRA, A. L. L. e SILVEIRA, G. L. Vazões mínimas. In: PAIVA, J. B. D e PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre, ABRH, 2001.

SOUZA, R. M. **Estimativas de vazões mínimas na bacia do Altíssimo Rio Negro, Região Sul-Brasileira com aplicação do modelo SWAT**. 2011. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SOUZA, R. M.; SANTOS, I. **Estimativa da variabilidade espacial de vazões mínimas na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, região sul-brasileira, com aplicação do modelo SWAT**. Ra' Ega, Curitiba, v. 28, p.134-153, abr. 2013.

SOUZA, R. M.; SANTOS, I.; KOBAYAMA, M. **O modelo SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro.** XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos.** Porto Alegre: Editora da Universidade/ UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia.** 3. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/ UFRGS, 2002.

USDA Soil Conservation Service. **National Engineering Handbook Section 4 Hydrology,** chapter 4-10, 1972.

VEIGA, B. V.; NORA, A. D. **Estudos de Inventários Hidrelétricos Simplificados: uma metodologia alternativa de avaliação da potência instalada.** Comitê Brasileiro de Barragens, Foz do Iguaçu, 2002.

VINAGRE, M. V. A. **Contribuições para a otimização do uso de turbinas axiais em pequenas centrais hidrelétricas de baixa queda na Amazônia.** 2010. 150 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Recursos Naturais, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

ZANIN, P.R. **Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica com reservatório.** 2015. 209f. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2015.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por iluminar, guiar e abençoar toda a minha trajetória de vida.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais Julio e Jurema, meu irmão Tiago, minha cunhada Pâmela, meus padrinhos José Clésio e Lenita, e meus avós maternos e paternos, pelo amor, dedicação e apoio incondicional.

Aos professores da Universidade Federal de Santa Catarina, pelo empenho e incansável dedicação ao ensino.

À minha orientadora e professora, Cláudia Weber Corseuil, por todo o suporte, compreensão e conhecimento transmitidos nesta etapa tão importante da graduação.

Aos professores Álvaro José Back, Eduardo Zapp, Éverton Fabian Jasinski. doutorando Felipe Mamédio e Vanessa pelo auxílio e atenção constantes.

Ao coordenador do curso Luciano Pfitscher, por sua dedicação ao curso de Engenharia de Energia.

Às minhas amigas e colegas, em especial Bruna, Janyara, Jaqueline, Julia, Lara, Maiarah e Natalia, pelo amor e momentos especiais que passamos juntas.

Aos meus amigos e companheiros diários do laboratório da universidade e estágio, Arieli, Gabriela, Mateus, Paula e Tainá, por toda ajuda e apoio para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina.

Ao laboratório de Engenharia de Computação - Campus Araranguá, pelo auxílio durante a realização deste trabalho.

À EPAGRI, ANA e INMET pela disponibilização dos dados e informações utilizados na realização deste trabalho.