# FABIANA REGINA PHILIPI

# USO DO MODELO SWAT PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE CONSERVAÇÃO EM MICROBACIA NOS ANDES EQUATORIANO NA GERAÇÃO DE SERVIÇO ECOSSISTÊMICO HIDROLÓGICO

São Paulo 2019

# FABIANA REGINA PHILIPI

Uso do modelo SWAT para avaliação do impacto de conservação em microbacia nos Andes equatoriano na geração de serviço ecossistêmico hidrológico

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Hidráulica e Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Arisvaldo Vieira Méllo Júnior

São Paulo 2019 Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisad responsabilidade única de	o e corrigido em re o autor e com a ar	elação à versão original, sob nuência de seu orientador.
São Paulo, <mark>24</mark> de	outubro	de _2019
Assinatura do autor:	fabiana fol	<u>ilipi</u>
Assinatura do orientador:	AiVM	llo Ta-

#### Catalogação-na-publicação

#### Philipi, Fabiana

Uso do modelo SWAT para avaliação do impacto de conservação em microbacia nos Andes equatoriano na geração de serviço ecossistêmico hidrológico / F. Philipi -- versão corr. -- São Paulo, 2019. 77 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

1.Hidrologia 2.Modelagem hidrológica 3.Uso do solo 4.SWAT 5.Serviço ecossistêmico hidrológico I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental II.t.

Ao meu pai, Philipi (*in memoriam*), com todo meu amor.

"Que bem maior que o homem é a Terra, A Terra e o seu arredor, Que encerra a vida, que na Terra não se encerra, A vida, a coisa maior, Que não existe onde não existe água, Mas que há onde há arte, Que nos alaga e nos alegra, quando a mágoa A alma nos parte"

Lenine e Carlos Rennó

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a vida pelo desejo de aprender.

Agradeço a minha família pelo amor e por minha formação.

Agradeço ao Bruno por ter me incentivado a iniciar essa caminhada.

Agradeço ao meu orientador, professor Arisvaldo Vieira Méllo Júnior, por ser um ser humano inspirador sempre disponível ao diálogo.

Agradeço à Wandréa, secretária da pós-graduação, pela paciência, doçura e disponibilidade para ajudar.

Agradeço à Camila Billerbeck, minha anja, por sua imensa generosidade.

Agradeço aos colegas pesquisadores equatorianos Boris Ochoa-Tocachi, Bert de Bievre e Paola Fuentes por serem solícitos e por acreditarem que a ciência é feita em parceria e de forma colaborativa.

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental pelos valiosos ensinamentos.

Agradeço aos amigos contemporâneos do departamento pela amizade e por toda a colaboração.

#### RESUMO

A metodologia apresentada neste trabalho contempla os aspectos relevantes para simulações hidrológicas de diferentes usos do solo avaliando o impacto nas componentes do ciclo hidrológico. O estudo foi realizado em uma microbacia localizada nos Andes equatoriano, onde foram propostos três cenários de uso do solo, o cenário de linha de base de regeneração natural gramínea, que é a vegetação típica do Páramo local, cultivo de batata e reflorestamento com Pinus. O modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) mostrou desempenho satisfatório tanto na simulação do cenário de linha de base como também na simulação dos demais cenários. A análise do impacto dos diferentes usos do solo nas parcelas do ciclo hidrológico confirma o cenário de linha de base como o mais favorável a ocorrência de vazões mínimas Q95, Q90 e Q50. Isto é, a Q95 do uso do solo bata é igual a 0,0171 mm/dia, da grama é igual a 0,0190 mm/dia e do Pinus é igual a 0,0185 mm/dia; a Q<sub>90</sub> do uso do solo bata é igual a 0,0282 mm/dia, da grama é igual a 0,0312 mm/dia e do Pinus é igual a 0,0295 mm/dia; e a  $Q_{50}$  do uso do solo bata é igual a 0,1155 mm/dia, da grama é igual a 0,1195 mm/dia e do Pinus é igual a 0,1150 mm/dia. Isto significa que a estratégia adotada pelo fundo FONAG (Fondo para la Conservación del Agua) de conservação está atingindo o objetivo esperado de garantir o abastecimento de água para a cidade de Quito. Avaliando-se o impacto dos diferentes regimes de vazões na geração de serviços ecossistêmicos, o meio ambiente e os seres vivos são beneficiados de diferentes formas tanto pela geração de escoamentos maiores e menores, como também menor magnitude de variação entre os escoamentos. Assim, é fundamental que as características estruturais e ecológicas da cobertura de terra e do local avaliado sejam levadas em consideração e que modelagem hidrológica seja executada, quando se implementará mudanças no uso do solo com o objetivo de garantir o abastecimento de água a jusante, ou com o objetivo de garantir a provisão de qualquer outro serviço ecossistêmico hidrológico, para que os objetivos esperados sejam alcançados.

Palavras-chave: Hidrologia, Modelagem hidrológica, Uso do solo.

#### ABSTRACT

The methodology presented in this work contemplates the relevant aspects for hydrological simulations of different uses of only evaluating or impacting components of the hydrological cycle. The study was carried out in a micro-location located in the Equatorian Andes, where three proposals for single use were made: as a base for natural grass regeneration, which was typical vegetation of the local Páramo, sweet potato cultivation and Pine reforestation. The hydrological model SWAT (Soil and Water Assessment Tool) showed a satisfactory performance both in simulation of baseline and in two simulations. An analysis of the impact of three different land uses on the hydrological cycle confirms the baseline as more favorable to higher minimum outflows as Q95, Q90 e Q50. Potato cultivation Q95 is 0,0171 mm/day, grass Q95 is 0,0190 mm/day and Pinus Q<sub>95</sub> is 0,0185 mm/day; potato cultivation Q<sub>90</sub> is 0,0282 mm/day, grass Q<sub>90</sub> is 0,0312 mm/day and Pinus Q<sub>90</sub> is 0,0295 mm/day; potato cultivation Q<sub>50</sub> is 0,1155 mm/day, grass  $Q_{50}$  is 0,1195 mm/day and Pinus  $Q_{50}$  is 0,1150 mm/day. This means that FONAG's (Conservation Water Fund) strategy of conservation is meeting the expected objective of guaranteeing water supply for the city of Quito. Assessing the impact of outflow different regimes on hydrological environmental services, environment and living beings are benefited in different ways both by higher and lower outflows, as well by minor scale in outflow variation. Therefore, it is vital that local structural and ecological characteristics to be considered and that hydrological simulation takes place, when land use change is going to take place in order to guarantee water supply, or aiming at providing any other hydrological ecosystem service, so that expected objectives can be achieved.

**Keyworlds:** Hydrology, Hydrological Modeling, Land use.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da bacia JTU2, o conjunto de bacias onde o FONAG atua e Quito, e o Equador20
Figura 2 - Andosol, tipo de solo encontrado na bacia JTU222
Figura 3 - Foto do local de estudo, destacando a cobertura vegetal natural da região, o Páramo e as regiões alagadas23
Figura 4 - Tipos de uso do solo encontrado na bacia JTU2: área alagada, Páramo e solo exposto
Figura 5 - Localização dos medidores de chuva e JTU_02_PT_02 e de vazão na bacia JTU225
Figura 6 - Temperatura máxima e mínima média mensal de 2014 a 201626
Figura 7 - Chuva média mensal de 2014 a 201627
Figura 8 - Ilustração esquemática do balanço hídrico no modelo SWAT28
Figura 9 - Sub-bacias 1 a 10 definidas na bacia JTU2 para modelagem hidrológica. 43
Figura 10 - Comparação entre o volume de chuva P, as vazões estimadas Qest e as vazões medidas Qmed no período de calibração e validação
Figura 11 - Distribuição da chuva mensal acumulada entre 2014 e 2016 e a mediana dos valores
Figura 12 - Curva de permanência do Escoamento diário Q nos cenários POTA, GRAMA e PINE62

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização física da bacia JTU221	
Tabela 2 – Dados do Andosol de entrada no SWAT45	5
Tabela 3 – Dados de entrada de cobertura do solo referentes ao uso do solo grama, batata e Pinus	5
Tabela 4 – Parâmetros calibrados do SWAT47	,
Tabela 5 – Avaliação do desempenho de modelos a partir dos coeficientes NSE e PBIAS50	)
Tabela 6 – Distribuição da declividade nas 10 sub-bacias nos 6 grupos54	ŀ
Tabela 7 – Resultado de desempenho a partir dos coeficientes NSE, PBIAS e R <sup>2</sup> 57	,
Tabela 8 – Resultado das parcelas ciclo hidrológico, biomassa e índice de área foliar60	)
Tabela 9 – Variação e relação das variáveis do ciclo hidrológico61	
Tabela 10 – Valores de Q <sub>95</sub> , Q <sub>90</sub> , Q <sub>50</sub> e Q <sub>10</sub> e variações nos cenários POTA e PINE em relação a linha de base GRAMA63	3
Tabela 11 – Resultado da calibração dos parâmetros77	,

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
<ul> <li>3.1 Serviços ecossistêmicos</li> <li>3.2 O ciclo hidrológico</li> <li>3.3 Uso do solo e o ciclo hidrológico</li></ul>	5 7 11 14 16
4. MATERIAL E MÉTODOS	20
<ul> <li>4.1 ÁREA DE ESTUDO</li> <li>4.2 DESCRIÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT</li></ul>	20 28 28 43 45 47 51 52
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO 5.2 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS E IMPACTOS NA PROVISÃO DE SERVIÇOS ECOSSIS HIDROLÓGICOS	54 stêmicos 58
6. CONCLUSÃO	67
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
8. ANEXO A	77

# SUMÁRIO

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com o *Millennium Ecosystem Assessment* (2005), os serviços ecossistêmicos são os benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas. Alterações no uso da terra implicam na mudança de provisão de serviços ecossistêmicos. Globalmente, a conversão de florestas e várzeas de rios em plantações e cidades têm levado ao aumento da produção de comida, madeira, do número de casas e de outras commodities, mas geram também o custo da redução de muitos serviços ecossistêmicos e da biodiversidade (LAWLER *et al.*, 2014). Somado a isso, o crescimento de grandes concentrações urbanas, resultando na formação de metrópoles, aumenta de forma exponencial a demanda por água.

Entre os serviços ecossistêmicos definidos pelo estudo *Millennium Ecosystem Assessment* (2005) estão os serviços reguladores, que são responsáveis por ações como regulação de água, regulação de erosão, regulação de doenças e regulação de pestes, entre outras. O papel do ecossistema em preservar os recursos hídricos é considerado um Serviço Ecossistêmico Hidrológico SEH (SILVA, 2013). A redução desses serviços traz grande vulnerabilidade ao bem-estar humano futuro (FISHER et al., 2009) e a manutenção da vida terrestre como um todo. A modificação de padrão, frequência e duração de enchentes pode eliminar rotas migratórias de peixes; aumento na frequência e duração de altas vazões pode deslocar organismos sensíveis a velocidade como fitoplâncton, peixes jovens e ovas (RICHTER et al., 1997).

Ecossistemas de montanha são conhecidos como frágeis, provendo importantes serviços ecossistêmicos como fornecimento de água doce para atividades antrópicas e subsistência em cidades andinas altas, onde os recursos hídricos são limitados (ESPINOSA et al., 2016). Eles também provem abrigo para a proteção da vida selvagem à variabilidade da precipitação e desempenham um papel importante na mitigação e adaptação às mudanças climáticas. O funcionamento natural desses ecossistemas está cada vez mais em risco não apenas como consequência do aquecimento global, mas também, devido à contínua expansão das atividades humanas (CRESPO et al., 2012).

1

O Páramo é a região de terras úmidas que cobre a região andina superior da Venezuela, Colômbia, Equador e Peru. Como resultado de seu alto rendimento hídrico, a maioria das principais cidades dos Andes (como Bogotá, Cali e Quito) se beneficia desse bioma para abastecimento doméstico e industrial de água, irrigação e geração de energia hidroelétrica. Só no Equador, mais de 3 milhões de pessoas são abastecidas por águas provenientes do Páramo (CRESPO et al., 2009).

Em 2000, o FONAG (*Fondo para la Conservación del Agua*) foi o primeiro fundo de água estabelecido na América Latina, criado pela prefeitura de Quito e pela EPMAPS (*Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento*) com o objetivo de conservar as bacias responsáveis pelo abastecimento de água da cidade. O FONAG trabalha com as comunidades locais e os proprietários de terras e tem como principal atividade realizar projetos de restauração ecológica através de ações de recuperação de vegetação ativa e passiva, recuperação do solo e apoiar as comunidades no desenvolvimento de sistemas agroflorestais e silvipastoris (Camacho, 2008; FONAG, 2017; Arias et al., 2010; Pagiola et al., 2002).

O IMHEA (*Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos*) é uma rede de instituições acadêmicas e não-governamentais com o objetivo de realizar monitoramento hidrológico participativo nos Andes. Através da produção de informações sobre os impactos no uso da terra e das intervenções em bacias hidrográficas nos serviços ecossistêmicos hidrológicos, é possível guiar os processos de tomada de decisão na gestão de bacias (OCHOA-TOCACHI et al., 2018). O resultado do monitoramento de 28 bacias hidrográficas da rede IMHEA, representando 16 partes interessadas locais em 9 regiões localizados no Equador, Peru e Bolívia, foi publicado por Ochoa-Tocachi et al. (2018), disponibilizando publicamente dados monitorados de precipitação e vazão, além de informações físicas, climatológicas e geográfica de cada bacia monitorada. Uma das bacias objeto de intervenção do FONAG, a Jatunhuaycu 2, está sendo monitorada pelo iMHEA e foi objeto do estudo de caso apresentado a seguir.

A modelagem matemática é uma alternativa para entendimento dos processos físicos hidrológicos que ocorrem em uma bacia. O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é adotado por estudos para mensurar o impacto de ações antrópicas na dinâmica das bacias. O modelo parte de uma caracterização física

detalhada do solo para interpretar o impacto de práticas de manejo no balanço hídrico da bacia, assim como o movimento de pesticidas, sedimentos ou nutrientes (NEITSCH et al., 2011).

São diversos os estudos realizados com o SWAT: Espinosa et al. (2016) avaliaram o impacto das mudanças no uso da terra e das mudanças climáticas na vulnerabilidade de bacias na Reserva Ecológica Angel no Equador. Quintero et al. (2009) avaliaram a geração de serviço ecossistêmico através de modelagem hidrológica de diferentes usos do solo em micro bacias nos Andes, Silva (2015) avaliou o impacto causado pelas áreas de preservação permanente ripárias e de áreas íngremes na quantificação do serviço ambiental hidrológico na bacia do rio Piracicaba no Brasil, Queiroz (2014) avaliou a aderência do modelo em simular vazões e fluxo de sedimento na bacia do rio Piracicaba no Brasil.

# 2. OBJETIVOS

Considerando a execução de modelagem hidrológica para estimar as variáveis do ciclo hidrológico, este trabalho propõe-se a avaliar o impacto da conservação realizada pelo fundo de água FONAG na geração de SEH na microbacia Jatunhuaycu 2, localizada no rio Napo, região oriental do Equador, componente do sistema de abastecimento de água de Quito.

Como objetivo específico, pode-se definir:

 - avaliar a aderência do modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) a simulação hidrológica de uma bacia hidrográfica nos Andes equatoriano através de calibração e validação considerando a vazão de referência e simulação de cenários de uso do solo na microbacia Jatunhuaycu 2.

A metodologia proposta será aplicada com base nos fundamentos referenciados e desenvolvidos para aplicação em sistemas complexos de recursos hídricos, observando-se sua resposta e adequabilidade ao caso prático exposto na sequência.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Serviços ecossistêmicos

A sustentabilidade do uso de recursos hídricos está baseada em três eixos principais: a viabilidade política, a promoção de justiça social e a realidade dos limites ecológicos da Terra. Quando esta sustentabilidade não é alcançada, o ser humano tem suas oportunidades limitadas e sua vida ameaçada (JACOBI e GRANDISOLI, 2017).

As perdas de cobertura naturais são imensas. Segundo a FAO (2001), durante a década de 1990, quase 15 milhões de hectares de floresta foram perdidos a cada ano em média, principalmente nos trópicos. Entre os principais processos de mudança de uso da terra, se destaca a conversão de áreas florestais em zonas para a produção de gado e agrícola. A falta de compensação pelos serviços ambientais gerados para outras pessoas é uma das causas deste fenômeno, pois os usuários de terra têm pouco incentivo para manutenção dos ecossistemas garantindo que os serviços ecossistêmicos serviços sejam fornecidos. A problemática em torno da necessidade da manutenção dos serviços resultou em pagamentos aos usuários de terra por esses serviços (PAGIOLA, ARCENAS, PLATAIS, 2005).

Diversas atividades de reflorestamento e diferentes manejos da terra têm sido conduzidos de forma a tentar reduzir o impacto ambiental nos ecossistemas causados pela ação antrópica. As interações entre hidrologia e uso da terra e as decisões de gestão têm recebido maior atenção nos últimos anos. A Associação Internacional de Ciências Hidrológicas (*International Association of Hydrological Sciences*, IAHS) declarou recentemente esta década *Panta Rhei*, o que pode ser traduzido como "tudo flui", com foco na dinâmica de mudança do ciclo da água e a conexão com a mudança de sistemas humanos (MONTANARI *et al.*, 2013). A ciência nomeada como sócio-hidrologia foi recentemente proposta como uma disciplina "inspirada no uso" para se concentrar em compreender o ciclo humano-modificado da água (SIVAPALAN *et al.*, 2014).

A quantificação dos serviços de água ou a noção de que os seres humanos

derivam de processos naturais, também é visto cada vez mais como um meio de elucidar as interações entre pessoas e água. Exemplos desta abordagem são abundantes em todo o mundo: através do seu programa Grain-to-Green, a China incentiva proprietários de terra a converter as culturas anuais a espécies perenes ou florestas naturais (HAMEL et al., 2015). Na América do Sul, já existem dezenas de fundos água que investem em medidas de conservação a montante para garantir o fornecimento de água potável a jusante (MARTIN-ORTEGA et al., 2013), como é o caso do FONAG (Fondo para la Conservación del Agua) implementado nas bacias que fornecem água para Quito no Equador. A provisão de serviços ecossistêmicos hidrológicos se torna ainda mais crítica em bacias altamente antropizadas (TERRADO et al., 2014). Nos Estados Unidos, investimentos públicos em projetos de recursos hídricos passaram a exigir a avaliação dos impactos aos serviços dos ecossistemas (HAMEL et al., 2015). A efetiva implementação de ações que favorecem os serviços ecossistêmicos implica em trade-offs em relação ao uso da terra que precisam ser levados em consideração (de GROOT et al., 2010). Um planejamento sistêmico com ferramentas quantificáveis, críveis, replicáveis e financeiramente viáveis é necessário para que resultados no longo prazo possam ser alcançados (BRAUMAN et al., 2007; BAGSTAD et al., 2013), considerando os diferentes serviços ecossistêmicos: captura de carbono, disponibilidade hídrica, produção de madeira, habitat, biodiversidade, entre outros (LAWLER et al., 2014).

A variação na distribuição espacial dos serviços ecossistêmicos pode ser elevada. O termo *hotspot* tem sido frequentemente utilizado para esta finalidade. As avaliações espaciais de serviços ecossistêmicos podem ser usadas para o planejamento sistemático de conservação e assegurar a capacidade a longo prazo de prestação de serviços dos ecossistemas. Considerar serviços ecossistêmicos nos planos de conservação são práticas bastante novas e que ainda precisam ser operacionalizadas (SCHROTER e REME, 2016).

Apesar do termo serviço ecossistêmico ser amplamente utilizado, são poucas as abordagens que avaliam os impactos de ações de conservação e mudança de uso do solo no ciclo hidrológico além da perspectiva da vida humana. A complexa dinâmica ecossistêmica que envolve a influência em diferentes habitats de diferentes espécies, interações bióticas, mudanças geomórficas e outros potenciais fatores críticos são raramente levados em consideração. Além disso, o uso de longas séries históricas de vazão e análise estatística da variabilidade de vazões naturais quase não são utilizados nas tomadas de decisões (RICHTER et al,, 1997).

#### 3.2 O ciclo hidrológico

De acordo com Tucci (2007), o ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre. O ciclo hidrológico é fundamentalmente a recirculação da água por meio da evaporação dos oceanos, da precipitação, da infiltração da água nos aquíferos e das reservas de água nos sistemas continentais (lagos, rios, represas e áreas alagadas) (TUNDISI; TUNDISI, 2010). Os fatores que impulsionam o ciclo hidrológico são a energia térmica solar, a força dos ventos, que transportam vapor d'água para os continentes, a força da gravidade responsável pelos fenômenos da precipitação, da infiltração e deslocamento das massas de água (TUNDISI, 2003; MELO NETO, 2013).

O ciclo hidrológico é fechado, se considerado em escala global. O balanço entre entradas e saídas de água em uma bacia hidrográfica é denominado balanço hídrico. A principal entrada de água de uma bacia é a precipitação. A saída de água da bacia pode ocorrer por evapotranspiração e por escoamento, de acordo com a Equação 1 que representa o balanço hídrico (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013):

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = P - ET - Q \qquad \qquad \text{Equação 1}$$

Sendo:

 $\Delta V$ : variação do volume de água armazenada na bacia (m<sup>3</sup>);

 $\Delta t$ : intervalo de tempo considerado (s);

P: precipitação (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>);

Q: escoamento  $(m^3.s^{-1});$ 

ET: evapotranspiração (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>).

O estudo da infiltração e da dinâmica de água no solo também é importante nas análises orientadas a quantificar a geração do escoamento superficial. A água que infiltra no solo deixa de escoar superficialmente, portanto, a redução da infiltração normalmente resulta no aumento do escoamento superficial, o que pode contribuir para aumentar a frequência e intensidade de cheias (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

O solo pode ser entendido como um reservatório de água para as plantas. O tamanho desse reservatório depende da diferença entre o conteúdo de água na condição de capacidade de campo e na condição de ponto de murcha permanente. O solo se comporta como uma espécie de reservatório de água. O conteúdo de umidade do solo é representado de uma forma média para uma camada que chega a alguns metros de espessura, correspondendo à zona de raízes de plantas (DINGMAN, 2002).

Considerando um volume de controle em torno de uma camada superficial do solo, a variação do volume de água ao longo de um intervalo de tempo pode ser estimada por meio da Equação 2, que representa o balanço de água na zona de raízes do solo (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013):

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = P + I + Qint - Qout - G + A - ET$$
Equação 2

Sendo:

V: volume armazenado na camada superficial do solo (mm);

P: precipitação (mm.dia<sup>-1</sup>);

I: irrigação (mm.dia<sup>-1</sup>);

Qint/out: volumes de água que escoam para dentro e para fora do volume de controle (mm.dia<sup>-1</sup>);

ET: fluxo de evapotranspiração (mm.dia<sup>-1</sup>).

A Equação 2 pode ser aplicada para simular o armazenamento de água no tempo, com o objetivo de analisar situações de estresse hídrico (a transpiração das plantas é

limitada pela baixa disponibilidade de água no solo) ou identificar necessidades de irrigação.

O retorno da água precipitada para a atmosfera, fechando o ciclo hidrológico, ocorre através da evapotranspiração (conjunto de evaporação e transpiração). A evaporação ocorre quando a água passa do estado líquido para o estado gasoso. A transpiração é a retirada de água do solo pelas raízes de plantas, transportando-a até as folhas e a passagem para a atmosfera. Uma das variáveis mais importante é a umidade do solo. Quando o solo está úmido as plantas transpiração começa a diminuir. A evapotranspiração pode ser medida de acordo com a Equação 3 (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013), considerando invariável o armazenamento no aquífero.

Sendo:

ET: evapotranspiração média (mm.ano<sup>-1</sup>);

P: precipitação média (mm.ano<sup>-1</sup>);

Q: vazão média (mm.ano<sup>-1</sup>).

Se for assumida uma precipitação constante de ano para ano, a equação do balanço hídrico indica que a vazão é indiretamente proporcional a quantidade de evapotranspiração. Uma redução na cobertura vegetal irá reduzir a quantidade de interceptação e transpiração. Se não existir um aumento correspondente em evaporação do solo, o escoamento anual deverá aumentar. A vegetação tem papel importante interceptando chuva e transpirando água (LEE e STEDNICK, 2003).

O impacto da mudança do uso da terra no ciclo hidrológico deve ser conduzido considerando a intercepção do dossel e a área foliar da copa, evapotranspiração, infiltração (PONETTE-GONZALEZ et al., 2014; BRAUMAN et al., 2007) e a profundidade da raiz, umidade e potencial hidráulico do solo (KRISHNASWARMY et al., 2013). Além disso, a complexidade da fisiologia dos ecossistemas florestais e reflorestados é enorme e difere em estrutura e composição o que implica em diferentes impactos na hidrologia (PONETTE-GONZALEZ et al., 2017).

9

Segundo Ponette-Gonzalez et al. (2014), a redução da erosão do solo em pastagens alpinas pode ser alcançada através do reflorestamento, o que ao mesmo tempo pode reduzir o escoamento anual da superfície consideravelmente devido ao aumento da evapotranspiração. A relação entre precipitação anual e escoamento anual também pode direcionar a área da cobertura do solo a ser reflorestada.

Os sistemas radiculares estabilizam os solos e quando a vegetação é removida, os solos nus são expostos a ações físicas que podem aumentar substancialmente a erosão (BRAUMAN et al., 2007). As florestas são eficientes na retenção de sedimentos, enquanto os solos compactados contribuem para o transporte de sedimentos para os rios (HONDA e DURIGAN, 2017). A vegetação também aumenta a capacidade de infiltração e pode aumentar a recarga e reduzir o escoamento (BRAUMAN et al., 2007). A água que percola para o aquífero é armazenada e transportada para o corpo de água, criando condições para manter rios perenes durante longos períodos de seca, ou percola profundamente sendo confinada em aquíferos profundos, não alimentando corpos de água superficiais (HONDA e DURIGAN, 2017).

A relação entre precipitação anual e escoamento anual também pode direcionar o montante da cobertura do solo para ser reflorestado. Em pequenas bacias hidrográficas com escoamento anual inferior a 10% da precipitação anual, a área reflorestada em mais de 20% pode levar à redução radical de escoamento. Além disso, em pequenas bacias hidrográficas com escoamento anual em torno de 30% da precipitação anual, o reflorestamento de 30% da bacia implica uma redução de cerca de 50% no escoamento (FARLEY, JOBBAGY, JACKSON, 2005). A cobertura florestal pode levar à redução ou extinção de umidade devido ao aumento da evapotranspiração e infiltração (OLIVEIRA et al., 2015).

A hipótese do *trade-off* entre evapotranspiração e infiltração de Bruijnzeel (1989, 2004) destaca a importância dos dois termos do balanço hídrico em avaliar a relação entre áreas florestadas (naturais ou reflorestadas) e o escoamento (GHIMIRE et al., 2014). Em contrapartida a redução de escoamento ocasionado pelo reflorestamento, o estudo conduzido por Krishnaswarmy et al. (2013) com 11 bacias hidrográficas em regiões húmidas dos trópicos concluiu que nascentes florestadas são decisivas para garantir a sustentabilidade das vazões mínimas durante a longa estação seca. Além

10

disso, o estudo apontou que pode levar um longo período, chegando a muitas décadas, para uma área florestada atingir características hidrológicas de floresta natural.

Não existem indicadores e quantidades fixas e pré-definidas sobre a área a ser reflorestada em uma bacia e sua localização, com o objetivo de se obter aumento ou redução de vazões, uma vez que o resultado depende das características físicas da bacia como o tipo de solo, seu uso e ocupação e o regime pluviométrico. De acordo com Ghimire et al. (2014) e Krishnaswarmy et al. (2013), as áreas a serem reflorestadas dependem do equilíbrio entre a evapotranspiração e a infiltração que resulta no armazenamento do solo capaz de manter o regime hidrológico na estação seca, no médio e longo prazo.

### 3.3 Uso do solo e o ciclo hidrológico

A relação entre o ciclo hidrológico e o papel meteorológico das florestas está em debate há mais de duzentos anos (ANDRÉASSIAN, 2004). Os programas de investimento em ações implementadas em bacias e pagamentos por serviços ecossistêmicos hidrológicos frequentemente utilizam mitos, uma abordagem baseada em relações assumidas entre a cobertura da terra e os resultados hidrológicos. Os fluxos de água raramente são quantificados e resultados imprevistos são comuns. O monitoramento dos principais fluxos hidrológicos no local de intervenção é mais eficaz do que a promoção de tipos particulares de cobertura terrestre. Ir além dos mitos de cobertura de terra exige que os programas (1) identifiquem o serviço de água específico de interesse e o fluxo hidrológico associado; (2) considerem as características estruturais e ecológicas da cobertura de terra local (PONETTE-GONZALEZ et al., 2014).

A variabilidade da vazão de um rio impacta a biota e o ecossistema, afetando a disponibilidade de habitat para organismos aquáticos, podendo gerar estresse hídrico em plantas, a alteração da estruturação da morfologia do canal do rio e das condições físicas dos habitats (TNC, 2009), além de poder impactar a disponibilidade e a qualidade de água para o uso humano. Assim, são comuns os estudos que avaliam a

relação entre a cobertura do solo e as vazões mínimas, médias e máximas, conforme descrito a seguir.

#### Vazão mínima

Adicionalmente à qualidade da água, o desmatamento altera a quantidade de água disponível da bacia com impactos distintos no regime de vazões, a exemplo o impacto do desmatamento na vazão mínima que pode diminuir devido à redução da infiltração ou aumentar com a redução da evapotranspiração (TUCCI e CLARKE, 1997; SILVA, 2013). Em um estudo de revisão sobre a vazão mínima, Smakhtin (2001) reportou que o desmatamento reduz a infiltração, o que diminui a recarga do aquífero e consequentemente o escoamento básico. Em consequência, há redução da vazão mínima uma vez que o escoamento básico mantém a vazão durante os períodos de estiagem.

Fujieda et al. (1997), em estudo realizado em duas pequenas bacias na Serra do Mar no Estado São Paulo, verificaram a importância da cobertura florestal na manutenção do escoamento básico e vazões mínimas. A revisão de diversos estudos publicados realizada por Andréassian (2014) revela uma tendência de impacto na vazão quando há alteração de 25% da cobertura do solo: a colheita da floresta contribui para o aumento da vazão mínima enquanto o reflorestamento contribui para a diminuição da vazão mínima. Andréassian (2014) também descreve um experimento onde o desflorestamento levou a redução das vazões mínimas, assim como destaca que diferentes tipos de florestas, como eucalipto ou nativa, e a localização da bacia, como no hemisfério norte ou sul, podem levar a diferentes resultados.

Em experimento realizado em microbacias nos Andes equatoriano, Buytaert et al. (2007) verificaram que as vazões mínimas no cultivo de espécies agrícolas e na vegetação natural (Páramo) são muito semelhantes, porém avaliando-se a curva de permanência do escoamento, a espécie agrícola gera uma resposta mais rápida da curva de permanência assim como perda de escoamento básico.

### Vazão média

No reflorestamento as vazões médias são reduzidas (TUCCI e CLARKE, 1997; ANDRÉASSIAN, 2004). Os impactos na redução do escoamento das florestas plantadas são maiores se são utilizadas espécies nomeadas comummente como exóticas (isto é, com características fisiológicas que resultam em maior consumo de água), como o eucalipto e pinus, e que têm maior impacto no uso da água devido ao maior aumento da evapotranspiração, além de promoverem pouco habitat para espécies que reduziriam a transmissão de doenças (BRAUMAN et al., 2007; SILVA, 2013). Em uma análise de 504 microbacias reflorestadas por eucaliptos em diversos países, Jackson et al. (2005) mostram que a vazão média anual de 52% das microbacias analisadas foi reduzida em média 227 mm ano<sup>-1</sup> e 13% dos riachos secaram. Os mesmos resultados foram encontrados em experimentos em microbacias pareadas nos Andes equatoriano, onde a plantação de Pinus resultou na redução do escoamento médio anual devido ao aumento na evapotranspiração (BUYTAERT et al., 2007; CRESPO et al., 2010).

Resultados semelhantes foram encontrados por Lucas et al. (2012) para a recarga do aquífero Guarani medido durante oito anos em onze poços distribuídos em diferentes culturas agrícolas no estado de São Paulo, onde os autores reportaram que a recarga média nas áreas de eucalipto foi nula no ano hidrológico menos chuvoso e igual a 241 mm no ano hidrológico chuvoso enquanto que nas áreas de cana-de-açúcar e pastagem a recarga média foi pelo menos o dobro, sendo estas iguais a 584 e 623 mm, respectivamente. Porém, essa redução na vazão é maior logo nos primeiros anos após o reflorestamento e tendem a diminuir gradualmente com o passar o tempo (ANDRÉASSIN, 2004).

#### Vazão máxima

Com relação às vazões máximas, estas tendem a aumentar com o desmatamento em maior proporção do que as vazões médias, devido ao aumento imediato do escoamento superficial durante eventos de chuva forte, o que aumenta os riscos de enchente (ANDRÉASSIAN, 2004). Mas em determinadas situações o resultado pode variar. Silva Júnior et al. (2004), em um estudo observacional no oeste

do Rio Grande do Sul, viram a importância da escala da bacia na determinação da vazão máxima. No estudo, compararam-se três bacias semelhantes, mas com diferentes escalas, todas sofreram o plantio direto, uma prática conservacionista do solo que favorece o aumento da infiltração. Nas bacias de microescala (até 1,1 km<sup>2</sup>) a vazão de pico reduziu em até 31%. Por outro lado, a bacia de mesoescala (19,5 km<sup>2</sup>) a vazão de pico aumentou em 39%. Andreássian (2004) também destaca a baixa ou nenhuma contribuição de reflorestamento para redução de vazões máximas e enchentes.

A China tem passado por um intenso processo de mudança de uso do solo no último século e um estudo realizado através de modelagem hidrológica nas principais bacias do país indicam que, se por um lado o processo de urbanização aumenta a vazão dos rios e contribui para resolução do déficit de água, também gera o aumento dos picos de vazão e a consequente dificuldade de contenção dos picos pelos reservatórios (LIU *et al.*, 2008).

Em modelagem hidrológica realizada em bacias hidrográficas localizadas nos Andes, as maiores vazões (ocasionadas pelos maiores escoamentos superficiais) foram encontradas com a cobertura do solo agrícola, onde aconteceu também a maior geração de sedimentos (QUINTERO et al., 2009). O mesmo resultado foi verificado em experimento realizado nos Andes equatoriano, onde o cultivo de espécie agrícola aumentou a incidência de vazão de pico e redução do escoamento básico (CRESPO et al., 2010).

3.4 O Páramo e serviços ecossistêmicos hidrológicos

A palavra em espanhol *páramo* se refere a áreas desertas, com vento, úmidas e frias do norte dos Andes. Esse ecossistema de pastagens de altitude, que possui grande diversidade de plantas, abrange 35.000 km<sup>2</sup> e é distribuído como ilhas descontínuas entre a floresta alta de altitude e a linha de neve permanente. Nos Páramos os solos evoluíram com baixa temperatura, alta umidade e disponibilidade de Al da rocha-mãe. O teor de carbono e retenção de água são muito altos. Os solos

são considerados "esponja" que melhoram a retenção de água e tamponam a fluxo de água a jusante. Contudo, novas práticas agrícolas modificam as propriedades do solo, alterando a infiltração e escoamento superficial e perturbando a função hidrológica primária dos Párarnos.

O Párarno está localizado entre a região central intertropical e a América do Sul, principalmente situado na Colômbia (14.500 km<sup>2</sup>) e no Equador (12.600 km<sup>2</sup>), mas também na Venezuela com pequenas extensões na Costa Rica, Panamá e Norte do Peru. Ele ocorre a uma altitude geralmente variando entre 3.200 e 4.800 m.

Com uma redução média de 0,6°C para cada 100 m de mudança elevação, as temperaturas são frias, com uma média anual de 9°C a 3.500 m. A amplitude dia-noite é superior a 15°C com temperaturas caindo aleatoriamente abaixo de 0°C acima de uma altitude de 4.200 m. A variação anual é muito baixa. A precipitação anual varia entre 1.000 e 1.500 mm com extremos entre 500 e 3000 mm. Nas áreas tropicais do Norte, as chuvas apresentam distribuição unimodal com uma estação seca. Na região Sul, mais próxima do Equador, apresenta uma distribuição bimodal de duas estações mais secas. As intensidades são muito baixas, raramente superior a 40 mm/dia. A presença de névoa frequente, chuviscos e granizo contribuem para manter um clima úmido, e a umidade do ar varia entre 70% e saturação (PODWOJEWSKI et al., 2004).

Vários países andinos estão restaurando a cobertura florestal, com a expectativa de melhorias nos serviços ecossistêmicos. Serviços ecossistêmicos hidrológicos, como abastecimento de água, regulação hidrológica e controle de erosão são particularmente importantes para sustentar a vida de mais de 50 milhões de pessoas andinas. Nas últimas décadas, rápidas e extensas mudanças na cobertura florestal, através do desmatamento e reflorestamento, modificaram extensivamente os serviços hidrológicos nos Andes. O reflorestamento é definido aqui como o estabelecimento de coberturas florestais sob a forma de plantações ou por regeneração natural em áreas que tinham florestas no passado ou não. Os argumentos favoráveis a esta atividade são produzir madeira, deter e reverter a degradação do solo, proteger a biodiversidade e melhorar os serviços hidrológicos (Bonnesoeur et al., 2019).

São diversos os estudos que indicam a plantação de Pinus em áreas degradadas nos Andes com o objetivo de prover serviços ecossistêmicos como produção de biomassa, sequestro de carbono e regulação hidrológica (Bonnesoeur et al., 2019). Plantações de Pinus reduzem consideravelmente a erosão de solos degradados (Manna et al., 2016). No Páramo, a taxa de infiltração saturada numa plantação de Pinus foi três vezes maior que a taxa em áreas com pastagem e entre os valores das taxas de duas florestas nativas (Quichimbo et al., 2012). Todos os estudos concordaram que a vazão de pico de eventos com um período de retorno de 10 anos ou menos poderia ser reduzido significativamente pela cobertura florestal. As plantações de Pinus podem ter uma capacidade um pouco menor para amortecer o pico de fluxo do que as florestas nativas, pois as florestas nativas apresentam escoamento superficial ligeiramente menor e capacidade de armazenamento de água no solo um pouco maior. A síntese de estudos em pequenas bacias pareadas mostrou claramente os efeitos negativos das plantações de Pinus em vazões mínimas: sua expansão em mais de 1% da área da bacia levou a uma diminuição de 0,4% da vazão mínima bacias com gramíneas e de 0,15% em bacias com ocupação de gado (Ochoa-Tocachi et al., 2018).

#### 3.5 Modelos hidrológicos

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que a envolvem, e é de maneira geral, um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros (RENNÓ; SOARES, 2000). Devido à complexidade dos processos hidrológicos no solo, associados à influência da cobertura vegetal e da distribuição espacial da precipitação a utilização de modelos matemáticos é praticamente imprescindível para uma adequada interpretação dos fenômenos envolvidos (COLLISCHONN, 2003; QUEIROZ, 2014).

Para Rennó (2003) os modelos hidrológicos podem ser classificados quanto à representação espacial (concentrados ou distribuídos), quanto à representação dos dados (discretos ou contínuos), quanto às variáveis utilizadas (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relação entre essas variáveis (empíricos ou baseados em processos) e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos).

16

O modelo concentrado considera uma média espacial do sistema (CHOW et al., 1988), onde suas equações omitem a variabilidade espacial dos parâmetros que caracterizam os processos físicos do sistema, dados de entrada, condições de contorno e características geométricas do sistema (SINGH, 1955; CLARKE, 1973). Modelos distribuídos consideram que os processos hidrológicos ocorrem em vários pontos do espaço e definem as variáveis do modelo como funções das dimensões do espaço (CHOW et al., 1988).

Segundo Singh (1995), um modelo hidrológico é dito discreto quando objetiva modelar períodos isolados da série. Os modelos contínuos buscam representar longos períodos da série, muitas vezes contemplando épocas de comportamentos hidrológicos diferentes (CHIN, 2000).

Os modelos que pertencem à categoria dos determinísticos são aqueles em que a causa e o efeito estão ligados diretamente (TRZESNIAK, 1998). Assim, a presença ou uma variação da primeira variável implica necessariamente no surgimento ou uma alteração da segunda, frequentemente obedecendo a uma lei matemática conhecida. Já no caso dos modelos estocásticos, a presença ou uma variação da causa refletese não no efeito, mas na probabilidade dele surgir ou se modificar (RIBEIRO, 2012).

Os modelos empíricos tomam como base o ajuste dos valores calculados por meio dos dados observados, enquanto os modelos baseados em processos contam na sua concepção com funções que levam em consideração os processos físicos (TUCCI, 2005).

Os modelos são considerados estáticos quando, com um conjunto de dados de entrada, produz-se um resultado oriundo da simulação realizada em um único passo. Já os modelos dinâmicos utilizam o resultado de uma dada iteração como entrada para a próxima iteração (RENNÓ, 2003).

A modelagem hidrológica viabiliza o entendimento dos processos hidrológicos e auxilia os tomadores de decisão a identificarem as melhores alternativas de gestão e manejo para que se alcancem os objetivos a médio e longo prazo (MELO NETO, 2013).

17

### <u>SWAT</u>

O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é o resultado de 30 anos de trabalho conduzidos pelo Departamento de Pesquisa de Agricultura dos Estados Unidos. É classificado como um modelo hidrológico e biogeoquímico, contínuo, dinâmico e determinístico (QUEIROZ, 2014). É considerado pelos desenvolvedores como distribuído. Porém, conforme será descrito nas próximas seções, apresenta características que permitem ser considerado também como um modelo semi-distribuído (FINK et al., 2007).

Neitsch et al. (2005) subdivide o SWAT em oito componentes principais responsáveis pelo armazenamento, gerenciamento e aplicação das informações de entrada no processo de simulação, sendo os componentes: clima, hidrologia, solo, erosão, crescimento de vegetal, manejo do solo, nutrientes e pesticidas (MELO NETO, 2013). Neste trabalho serão detalhados somente os componentes hidrologia e clima de acordo com Neitsch et al. (2005), visto que são as estruturas responsáveis pela simulação do balanço hídrico na bacia.

A simulação da hidrologia da bacia hidrográfica pode ser separada em 2 principais divisões. A primeira é a fase do terreno do ciclo hidrológico que controla a quantidade de água no canal principal de cada sub-bacia. A segunda divisão é a fase do itinerário do ciclo hidrológico, que pode ser definida como a movimentação da água pela rede de canais da bacia hidrográfica até a descarga (SWAT, 2011).

O SWAT, em sua concepção, particiona o ciclo hidrológico em seis processos principais: interceptação, infiltração, escoamento superficial, escoamento lateral, evapotranspiração e percolação. Parte da água precipitada pode ser interceptada pela vegetação, podendo assim retornar a atmosfera pelo processo de evaporação, e parte atinge a superfície do solo. Da parcela que atinge a superfície do solo, uma parcela infiltra e outra pode escoar superficialmente. A parcela infiltrada será redistribuída ao longo do perfil do solo podendo retornar a atmosfera através do processo de evapotranspiração ou promover a recarga do lençol freático e aquífero profundo. Dentro dessa perspectiva, o modelo opera considerando quatro volumes de controle para estimativa do balanço hídrico: superficial, subsuperficial, aquífero raso e aquífero

profundo (MELO NETO, 2013).

No Brasil, o SWAT é utilizado com grande frequência em estudos acadêmicos: existem mais de 100 publicações com a utilização do modelo entre 1999 e 2015 (BRESSIANI, 2015). Nos Andes, é possível encontrar publicações que realizam modelagem hidrológica com o SWAT com o objetivo de: avaliar aspectos qualitativos como dispersão de poluentes e erosão do solo; e análise das componentes hidrológicas sob cenários de mudanças climáticas. Considerando o impacto da alteração do uso do solo nas variáveis do ciclo hidrológico nos Andes, Espinosa e Rivera (2016) conduziram um estudo na região do parque El Angel no norte do Equador; Quintero et al. (2009) avaliaram a geração de serviço ecossistêmico hidrológico na bacia Moyobamba, no Peru, e na bacia Pimampiro, no Equador.

# 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

Os mapas apresentados a seguir foram produzidos no software ArcGis versão 10.3.

### <u>Localização</u>

A microbacia Jatunhuaycu 2 (JTU 02) está localizada entre as coordenadas -0,46° e -0,48° Sul e entre as coordenadas -78.25° e -78.23° Oeste, na encosta amazônica dos Andes. Ela drena para o rio Jatunhuaycu, afluente do río Napo e faz parte do sistema La Mica, que é uma lagoa artificialmente melhorada para ser um reservatório e abastecer o vale Inter-Andino e a cidade de Quito.



Figura 1 - Localização da bacia JTU2, o conjunto de bacias onde o FONAG atua e Quito, e o Equador

### Caracterização física

A caracterização física da microbacia Jatunhuaycu 2 (JTU2) foi realizada levando-se em conta aspectos físicos da bacia, tipo de solo, uso do solo, medições de vazão e chuva, que serão descritos a seguir.

Descrição	Unidade	JTU02
Área	km <sup>2</sup>	2,41
Perímetro	km	7,35
Índice de compacidade	-	1,33
Fator de forma	-	0,33
Índice de conformação	-	0,30
Caminho mais longo de drenagem	km	2,69
Linha mais longa paralela ao principal curso	km	2,46
Densidade de drenagem	1/km	1,30
Tempo de concentração	h	6,25
Elevação máxima	m	4.322
Elevação mínima (no ponto de medição de		
vazão)	m	4.085
Declividade média da bacia	%	22
Declividade média do curso d´água	%	6,62

Tabela 1 – Caracterização física da bacia JTU2.

Fonte: Ochoa-Tocachi et al. (2018).

O índice de compacidade relaciona a forma da bacia com um círculo. Constitui a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia. Quanto mais irregular for a bacia, maior será o coeficiente de compacidade. Um coeficiente mínimo igual à unidade corresponderia a uma bacia circular e, para uma bacia alongada, seu valor é significativamente superior a 1. Uma bacia será mais suscetível a enchentes mais acentuadas quando o índice de compacidade for mais próximo da unidade. O fator de forma é a relação entre a largura média da bacia e o seu comprimento axial. O índice de conformação é o resultado da relação entre a área da bacia e um quadrado de lado igual ao comprimento axial da bacia, expressando a capacidade da bacia em gerar enchentes. Apesar da bacia apresentar índice de compacidade não muito maior que 1, seu fator de forma igual a 0,33 e índice de conformação igual a 0,3 indicam uma baixa propensão a ocorrência de enchentes. A densidade de drenagem, que é a divisão do comprimento total de todos os segmentos de drenagem pela área da bacia, igual a 1,3 indica uma baixa capacidade de drenagem. A baixa capacidade de drenagem pode ser explicada pela baixa declividade média do curso d´água e pela presença de áreas alagadas (conforme descrito a seguir em Uso do Solo) que amortecem o deslocamento da água.

# <u>Tipo de solo</u>

O Andosol é o solo mais comumente encontrado nos Andes e é conhecido por ser um solo raso e ter grade capacidade de reter água devido a sua grande porosidade e alto teor de carbono, contribuindo para regulação do ciclo hidrológico (PODWOJEWSKI et al., 2004). Andosol compõe toda a área bacia JTU2, conforme apresentado na Figura 2.



Figura 2 - Andosol, tipo de solo encontrado na bacia JTU2.
# <u>Uso do solo</u>

O Páramo da região de estudo é caracterizado por uma vegetação composta por gramíneas (Buytaert et al., 2005; Vásconez et al. 2011; Ochoa-Tocachi et al., 2018) que vem sofrendo degradação devido a criação de gado e substituição por espécies agrícolas e plantações de Pinus, conforme Figura 3.



Figura 3 - Foto do local de estudo, destacando a cobertura vegetal natural da região, o Páramo e as regiões alagadas. Fonte: Ochoa-Tocachi et al., 2018.

Conforme informações disponibilizadas por Ochoa-Tocachi et al. (2018), a bacia Jatunhuaycu 2 tem um histórico de degradação por ocupação de gado e queimadas. Sua cobertura também é composta por áreas alagadas. Em 2011 sua área deixou de ser uma fazenda e o gado foi eliminado. A partir de então, se iniciou um processo de restauração passiva. Atualmente, a cobertura do solo é composta por área alagada e Páramo (gramínea), que correspondem a 51% e 49% da área total respectivamente, e esse cenário foi considerado como linha de base (GRAMA), conforme Figura 4.



Figura 4 - Tipos de uso do solo encontrado na bacia JTU2: área alagada, Páramo e solo exposto

## Chuva e vazão

A iniciativa IMEA implementou pluviógrafos que medem a quantidade de chuva por evento (JTU\_02\_PT\_01 e JTU\_02\_PT\_02) e sensores que medem o nível d'água a cada 15 minutos (JTU\_02\_HQ\_01).



vazão na bacia JTU2.

Os dados de chuva e vazão apresentam grande acurácia pois são provenientes de medidores implementados na própria bacia. A precisão desses dados é fundamental para a realização de modelagem hidrológica.

Os dados climatológicos (umidade, radiação solar, velocidade do vento e temperatura do ar) foram provenientes de estação meteorológica M5029 da FONAG localizada nas coordenadas -0,502° Sul e -79,666° Oeste. Estas variáveis são os dados de entrada para o cálculo da Evapotranspiração, conforme será descrito a seguir. Apesar da estação meteorológica não estar localizada exatamente na região da bacia hidrográfica, e considerando que a região Andina apresenta grande variação de altitude em pequenos deslocamentos, o que pode resultar em grandes variações nas variáveis climatológicas, tomou-se a decisão de utilizar esses dados medidos,

pois avaliou-se que estes são mais precisos que a utilização do módulo de geração automática de dados climatológicos do modelo SWAT.

A distribuição das médias mensais das temperaturas máximas e mínimas entre 2014 e 2016 está apresentada no Figura 6, sendo a temperatura média máxima igual a 10°C e a temperatura média mínima igual a 2,29°C.



Figura 6 - Temperatura máxima e mínima média mensal de 2014 a 2016.

Na Figura 7 está representada a distribuição das médias mensais das precipitações entre 2014 e 2016, sendo o valor de precipitação média anual igual a 871 mm entre 2014 e 2016.



Figura 7 - Chuva média mensal de 2014 a 2016.

As altas regiões dos Andes equatoriano cobertas pelo Páramo são caracterizadas por um clima frio e úmido (Buytaert et al., 2004). Apesar de não apresentar altos índices de precipitação, a presença de névoa frequente, chuviscos e granizo contribuem para manter um clima úmido, e a umidade do ar varia entre 70% e saturação (PODWOJEWSKI et al., 2004).

4.2 Descrição do modelo hidrológico SWAT

O software ArcGis apresenta uma interface gráfica para o modelo SWAT, que foi utilizado na versão 2012.

4.2.1 Ciclo Hidrológico

Segundo Abbasppour et al. (2015), o balanço hídrico realizado no modelo SWAT pode ser representado conforme a Figura 8.



Figura 8 - Ilustração esquemática do balanço hídrico no modelo SWAT.

Fonte: Abbasppour et al. (2015)

Na Figura 8, "P" indica precipitação, "ET" indica evapotranspiração, "I" indica infiltração, "Q" indica escoamento superficial, "Qlat" indica escoamento lateral, "Qgw" indica escoamento subterrâneo, "FC" indica fluxo capilar, "RA" indica recarga do aquífero, "RAP" indica a recarga do aquífero profundo e "S" a umidade do solo. A umidade do solo (S) é uma característica física que determina o comportamento da água no solo. A recarga do aquífero profundo (RAP) não é considerada no cálculo do balanço e pode ser considerada como perdida. O fluxo capilar (FC) e a recarga do aquífero (RA) são processos intermediários relacionados aos processos evapotranspiração (ET), infiltração (I), escoamento superficial (Q), escoamento

subterrâneo (Qgw) e escoamento lateral (Qlat), sendo que o balanço hídrico, o escoamento total (Qt) e o escoamento básico (Qb) podem ser equacionados da seguinte forma:

P = ET + Q + I + Qlat + Qgw	Equação 4
Qt = Q + Qlat + Qgw	Equação 5
Qb = Qlat + Qgw	Equação 6

A partir desse balanço hídrico serão descritos os equacionamentos aplicados no modelo SWAT.

### Interceptação

O dossel pode afetar significativamente a infiltração, escoamento superficial e evapotranspiração. A influência que o dossel exerce sobre estes processos é uma função da densidade da cobertura da planta e da morfologia das espécies de plantas. Neste estudo o método do número da curva do SCS, descrito a seguir, foi escolhido para cálculo do escoamento superficial e para este cálculo a intercepção é incorporada nas abstrações iniciais.

O SWAT permite que a quantidade máxima de água que pode ser retida no dossel seja calculada dia a dia como função do índice de área foliar:

$$can_{day} = can_{mx} \cdot \frac{IAF}{IAF_{mx}}$$
 Equação 7

Sendo:

canday: máxima quantidade de água retida no dossel em um dia (mm);

can<sub>mx</sub>: máxima quantidade de água retida no dossel totalmente desenvolvido (mm);

IAF: índice de área foliar em um dado dia (-);

IAF<sub>mx</sub>: índice de área foliar máximo da planta (-).

### Evapotranspiração

O método de Penman-Monteith foi escolhido para o cálculo que se baseia na radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento.

$$\lambda E = \frac{\Delta (R_n - G) + \frac{\rho_{ar} c_p \Delta_e}{r_a}}{\Delta + \gamma (1 + \frac{r_c}{r_a})}$$
Equação 8

Sendo:

λE: densidade do fluxo de calor latente de evaporação (MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>);

Δ: declividade da curva de saturação de vapor d'água (kPa.ºC<sup>-1</sup>);

R<sub>n</sub>: radiação líquida (MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>);

G: fluxo de calor no solo (MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>);

ρ<sub>ar</sub>: densidade do ar (kg.m<sup>-3</sup>);

c<sub>p</sub>: calor específico do ar (MJ.kg<sup>-1</sup>.ºC<sup>-1</sup>);

Δ<sub>e</sub>: déficit de pressão de vapor d'água (kPa);

 $\gamma$ : coeficiente psicométrico (kPa.ºC<sup>-1</sup>);

rc: resistência da cultura à difusão do vapor d'água (s.m-1);

r<sub>a</sub>: resistência aerodinâmica à difusão do vapor d'água (s. <sup>-1</sup>).

Determinada a evapotranspiração potencial, o modelo calcula a evapotranspiração total primeiramente considerando a evaporação de toda a precipitação interceptada pela cobertura vegetal. Como o método selecionado para o cálculo da evapotranspiração foi o de Penman-Monteith, a equação 8 também incorpora o cálculo da transpiração. Por último, será calculada a evaporação do solo.

A evaporação é determinada a partir da evapotranspiração potencial separada

em duas condições. Se a evapotranspiração potencial (Eo) for menor que a quantidade de água livre retida nas copas (Rint), ou se a evapotranspiração potencial (Eo) for maior que a quantidade de água livre mantida nas copas (Rint):

$$Ea = Ecan = Eo$$
 se  $R_{int(f)} = R_{int(i)} - Ecan$  Equação 9  
 $Ea = R_{int(f)}$  se  $R_{int(f)} = 0$  Equação 10

Sendo:

E<sub>a</sub>: quantidade de evapotranspiração real que ocorre numa bacia hidrográfica (mm.dia<sup>-1</sup>);

Ecan: quantidade de evaporação de água livre nas copas (mm.dia<sup>-1</sup>);

E<sub>o</sub>: a evapotranspiração potencial (mm.dia<sup>-1</sup>);

R<sub>int(i)</sub>: quantidade inicial de água livre mantida nas copas (mm.dia<sup>-1</sup>);

R int(f): quantidade final de água livre mantida nas copas (mm.dia<sup>-1</sup>).

A quantidade de água evaporada do solo é estimada pela utilização de funções exponenciais conforme a profundidade do solo e da quantidade de água. A distribuição da profundidade utilizada para determinar a quantidade máxima de água que pode ser evaporada é:

$$E_{solo,z} = E''_s \cdot \frac{z}{z + exp(2,374 - 0,00713.z)}$$
 Equação 11

Sendo:

Esolo,z: demanda de evaporação na profundidade z (mm);

E"s: evaporação máxima da água no solo (mm.dia<sup>-1</sup>);

z: profundidade da camada do solo a partir da superfície (mm).

A quantidade de demanda evaporativa para uma camada de solo é determinada pela diferença entre as demandas evaporativas nas camadas superiores e inferiores do perfil do solo:

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu}$$
 Equação 12

Sendo:

E<sub>soil,ly</sub>: demanda evaporativa para a camada l<sub>y</sub> (mm);

Esoil,zl: demanda evaporativa na camada inferior do solo (mm);

Esoil,zu: demanda evaporativa na camada superior do solo (mm).

Essa equação pode ser reescrita com a adição da variável *esco*, permitindo que se modifique a distribuição de profundidade utilizada para atender a demanda evaporativa do solo:

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu}$$
. esco Equação 13

Sendo:

Esoil,ly: demanda evaporativa para a camada ly (mm);

Esoil,zl: demanda evaporativa na camada inferior do solo (mm);

Esoil,zu: demanda evaporativa na camada superior do solo (mm);

esco: coeficiente de compensação de evaporação do solo.

Conforme o valor de *esco* é reduzido, o modelo é capaz de extrair mais da demanda evaporativa de níveis mais baixos do solo.

### Escoamento Superficial

O escoamento superficial direto foi calculado pelo método do número da curva do SCS, uma vez que o método de Green e Ampt modificado por Mein e Larson (1973) requer discretização inferior a um dia.

$$Q = \frac{(R - 0.2.S)^2}{R + 0.8.S} \quad \text{se } R > 0.2.S$$
 Equação 14

$$Q = 0 \ se \ R \le 0.2.S$$
 Equação 15

Sendo:

Q: escoamento superficial diário (mm);

R: precipitação diária (mm);

S: máxima infiltração potencial (mm).

O parâmetro S irá variar em função da classe, uso e manejo do solo na bacia; e em relação às características físicas da bacia.

$$S = 254. \left(\frac{100}{CN} - 1\right)$$
 Equação 16

O CN é o parâmetro adimensional que dá nome ao método do número da curva e é definido de acordo com as características de uso e ocupação do solo, manejo da cobertura do solo e infiltração do solo. Os solos são classificados em grupos hidrológicos que buscam representar suas potencialidades para gerar escoamento superficial, classificados nos grupos A, B, C e D.

O CN varia de 1 (cobertura extremamente permeável) a 100 (cobertura extremamente impermeável) em uma escala não linear. Os valores do CN são representados em três condições de umidade do solo, sendo o CN1 a Curva-Número para solos com baixa umidade; o CN2 a Curva-Número para solos com umidade próxima à capacidade de campo; e o CN3 a Curva-Número para solos com umidade acima da capacidade de campo.

Os CN's de umidade II contidos nas tabelas do banco de dados do modelo são considerados apropriados para 5% de declividade. O SWAT não ajusta os números de curva para a inclinação. Se o usuário desejar ajustar, o ajuste deve ser feito nos arquivos de entrada de gerenciamento.

O SWAT permite o cálculo de alguns parâmetros físicos que contribuem na estimativa do escoamento, como o atraso no escoamento superficial e as perdas por transmissão.

### Atraso no Escoamento Superficial

Considerando que o atraso no escoamento superficial ocorre em grandes bacias, com um tempo de concentração superior a um dia, onde apenas uma parte do escoamento superficial atingirá o canal principal no dia em que for gerado, esta etapa foi desconsiderada já que o tempo de concentração da bacia JTU2 é igual a 6,25 horas.

### Perdas por Transmissão

Muitas bacias hidrográficas semiáridas e áridas têm canais efêmeros que abstraem grandes quantidades de fluxo. As abstrações ou perdas por transmissão reduzem o volume de escoamento à medida que a onda de viaja a jusante. O resultado da simulação indicou que não há perda por transmissão.

### Fase Solo

A água que infiltra no solo pode escoar por uma ou por várias rotas diferentes. A água pode ser absorvida pelo solo, pelas plantas ou por evaporação. Ela pode percolar para além da base do perfil do solo e finalmente, se transformar em uma reposição aquífera. Uma terceira hipótese é a de que a água possa se deslocar lateralmente no perfil e contribuir para o fluxo do rio. Dessas três possibilidades, a absorção da água é a que remove a maior parte da água que penetra no perfil do solo (SWAT, 2011).

A água disponível para as plantas, também referida como a capacidade de água disponível, é calculada pela subtração da fração da água existente no ponto de murcha permanente da água presente na capacidade de campo. O fluxo ocorre quando a umidade de uma camada do solo ultrapassa sua capacidade de campo. O excesso da água na capacidade de umidade do campo fica disponível para percolação, escoamento lateral ou para drenagem agrícola (SWAT, 2011).

### Percolação

A porcentagem de percolação é calculada para cada camada de solo no perfil. A percolação ocorre se o teor de água exceder o teor de água na capacidade do campo para essa camada e a camada abaixo não estiver saturada. O volume de água disponível para percolação na camada do solo é:

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly}$$
 se  $SW_{ly} > FC_{ly}$  Equação 17  
 $SW_{ly,excess} = 0$  se  $SW_{ly} \le FC_{ly}$  Equação 18

Sendo:

SW<sub>ly,excess</sub>: volume de água drenável na camada do solo em um dia (mm);

SW<sub>ly</sub>: conteúdo de água na camada de solo em um dia (mm);

FC<sub>ly</sub>: conteúdo de água na camada de solo na capacidade de campo (mm).

A quantidade de água que se move de uma camada para a camada subjacente é calculada usando a metodologia de rotina de armazenamento. A equação usada para calcular a quantidade de água que percola para a próxima camada é:

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot \left(1 - exp \left\lfloor \frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right\rfloor\right)$$
 Equação 19

Sendo:

W<sub>perc,ly</sub>: quantidade de água que percola para a camada inferior em um dia (mm);

SW<sub>ly.excess</sub>: volume de água drenável na camada do solo em um dia (mm);

∆t: duração do passo de tempo (h);

TT<sub>perc</sub>: tempo de viagem de percolação (h).

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}}$$
 Equação 20

Sendo:

TT<sub>perc</sub>: tempo de viagem de percolação (h);

SAT<sub>ly</sub>: quantidade de água na camada do solo quando completamente saturada (mm);

FC<sub>ly</sub>: quantidade de água na camada do solo na capacidade de campo (mm);

K<sub>sat</sub>: condutividade hidráulica saturada para a camada (mm·h<sup>-1</sup>).

### Fluxo lateral

O fluxo lateral será significativo em áreas com solos com alta condutividade hidráulica em camadas superficiais e uma camada impermeável ou semipermeável a uma profundidade rasa. Em tal sistema, a precipitação irá percolar verticalmente até encontrar a camada impermeável. A água então fica perto da camada impermeável formando uma zona saturada de água, que é a fonte de água para o fluxo subterrâneo lateral. O SWAT incorpora um modelo de armazenamento cinemático para o fluxo subterrâneo subterrâneo desenvolvido por Sloan et al. (1983) e resumido por Sloan e Moore (1984) (SWAT, 2011).

$$Q_{lat} = 0,024. \left(\frac{2.SW_{ly,excess}.K_{sat}.slp}{\Phi_d.L_{hill}}\right)$$
Equação 21

Sendo:

Q<sub>lat</sub>: quantidade de água que escoa sub-superficialmente (mm);

SW<sub>ly,excess</sub>: volume de água drenável armazenado numa zona saturada por unidade de área (mm);

K<sub>sat</sub>: condutividade hidráulica saturada (mm·h<sup>-1</sup>);

slp: declividade média da sub-bacia (mm·h<sup>-1</sup>);

Φd: porosidade drenável da camada de solo (mm.mm<sup>-1</sup>);

Lhill: o comprimento do declive (m).

### Atraso no Fluxo Lateral

Considerando que o atraso no fluxo lateral ocorre em grandes bacias, com um tempo de concentração superior a um dia, onde apenas uma parte do fluxo lateral atingirá o canal principal no dia em que for gerado, esta etapa foi desconsiderada já que o tempo de concentração da bacia JTU2 é igual a 6,25 horas.

### <u>Aquífero</u>

A água subterrânea é água na zona saturada sob pressão superior à atmosférica, isto é, pressão positiva. A água entra no armazenamento de águas subterrâneas principalmente por infiltração e percolação. A água deixa o armazenamento de águas subterrâneas principalmente por descarga nos rios ou lagos, mas também é possível que a água se mova para cima da camada da água para a franja capilar.

#### <u>Recarga</u>

A água que passa da menor profundidade do solo por percolação ou se torna fluxo de derivação através da zona vadosa antes de se tornar superficial e/ou recarga profunda do aquífero. O atraso entre o tempo que a água sai do perfil do solo e entra no aquífero raso dependerá da profundidade do lençol freático e das propriedades hidráulicas das formações geológicas na zona vadosa e zonas de águas subterrâneas.

Uma função de ponderação de decaimento exponencial proposta por Venetis (1969) e usado por Sangrey et al. (1984) em um modelo de resposta a precipitação/água subterrânea é utilizado na SWAT para contabilizar o atraso na recarga do aquífero quando a água sai do perfil do solo. A função de atraso acomoda situações em que a recarga da zona do solo para o aquífero não é instantânea, ou seja, 1 dia ou menos.

A recarga para ambos os aquíferos em um determinado dia é calculada:

 $w_{rchrg} = (1 - \exp[-1/\delta_{gw}]) \cdot w_{seep} + \exp[-1/\delta_{gw}] \cdot w_{rchrg,i-1} \quad \text{Equação 22}$ 

Sendo:

w<sub>rchrg,i</sub>: quantidade de recarga em ambos aquíferos em um dia i (mm);

 $\delta_{gw}$ : tempo de atraso ou tempo de drenagem das formações geológicas sobrepostas (dias);

wseep: quantidade total de água que sai da camada mais profunda do solo (mm);

w<sub>rchrg,-i</sub>: quantidade de recarga em ambos aquíferos em um dia i-1 (mm).

A quantidade total de água que sai da camada mais profunda do solo no dia i é calculada como:

$$w_{seep} = w_{perc,ly=n} + w_{crk,btm}$$
Equação 23

Sendo:

w<sub>seep</sub>: quantidade total de água que sai da camada mais profunda do solo no dia i (mm);

w<sub>perc,ly=n</sub>: quantidade de água que percola a menor camada, n, no perfil do solo no dia i (mm);

w<sub>crk,btm</sub>: quantidade de água que flui além do limite inferior do perfil do solo no dia i (mm).

#### Partição da recarga entre aquífero raso e aquífero profundo

Uma fração da recarga diária total pode ser encaminhada para o aquífero profundo. A quantidade de água que será desviada do aquífero raso devido a percolação para o aquífero profundo em um determinado dia é:

$$w_{deep} = \beta_{deep} \cdot w_{rchrg}$$
 Equação 24

Sendo:

wdeep: quantidade de água movendo para o aquífero profundo em um dia (mm),

 $\beta_{deep}$ : coeficiente de percolação do aquifer profundo (-),

w<sub>rchrg</sub>: quantidade de recarga em ambos aquíferos em um dia (mm).

## Aquífero raso

O aquífero raso contribui com um escoamento subterrâneo para o canal principal ou afluente dentro da sub-bacia. Este escoamento acontece somente se a quantidade de água armazenada no aquífero raso excede o nível de água limiar no aquífero, o aq<sub>shth,q</sub> (mm H<sub>2</sub>O).

$$Q_{gw} = \frac{8000.K_{sat}}{L_{gw}^2} . h_{wtbl}$$
 Equação 25

Sendo:

Qgw: água subterrânea ou escoamento básico no canal principal no dia i (mm);

Ksat: condutividade hidráulica no aquífero (mm/dia);

L<sub>gw</sub>: distância da sub-bacia ao canal principal (m);

h<sub>wtbl</sub>: altura da camada de água (m).

Caso ocorra a recarga do aquífero raso, o escoamento subterrâneo será calculado pela equação 27:

$$Q_{qw,i} = Q_{qw,i-1} \exp[-\alpha gw. \Delta t] + wrchrg, sh. (1 - \exp[-\alpha. \Delta t])$$
 Equação 26

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

$$Q_{gw,i} = 0$$
 Equação 27

se  $aq_{sh} \leq aq_{shthr,q}$ 

Qgw,i: escoamento subterrâneo no canal principal no dia i (mm);

Q<sub>gw,i-1</sub>: escoamento subterrâneo no canal principal no dia i-1 (mm);

αgw: constante de recessão de escoamento subterrâneo;

∆t: passo de tempo (1 dia);

wrchrg,sh: quantidade de recarga entrando no aquífero raso no dia i (mm);

aq<sub>sh</sub>: quantidade de água armazenada no aquífero raso no início do dia i (mm);

aq<sub>shthr,q</sub>: nível limite de água no aquífero raso para que ocorra a contribuição da água subterrânea para o canal principal (mm).

Caso a recarga do aquífero raso não aconteça, o escoamento subterrâneo será calculado por:

$$Q_{gw} = Q_{gw,0} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot t]$$
 Equação 28

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

 $Q_{gw,i} = 0$  Equação 29

se 
$$aq_{sh} \leq aq_{shthr,q}$$

Q<sub>gw</sub>: escoamento subterrâneo no canal principal no dia i (mm);

Q<sub>gw,0</sub>: escoamento subterrâneo no canal principal no início da recessão, isto é, quando t é igual a zero (mm);

αgw: constante de recessão de escoamento subterrâneo;

t: tempo transcorrido desde o começo da recessão (dias).

#### <u>REVAP</u>

A água pode se mover do aquífero raso para a zona não saturada acima. Nos períodos em que a camada que sobrepõe o aquífero está seco, a água na franja capilar que separa as zonas saturadas e não saturadas irá evaporar. À medida que a água é removida da franja capilar por evaporação, é substituída por água do aquífero abaixo. A água também pode ser removida do aquífero por plantas profundamente enraizadas que são capazes de absorver água diretamente do aquífero. O SWAT modela o movimento da água em camadas não saturadas sobrepostas como uma função da demanda de água para evapotranspiração. Para evitar confusão com a evaporação e transpiração, este processo foi denominado "revap". Este processo é significativo em bacias hidrográficas onde a zona saturada não está muito abaixo da superfície ou onde plantas de raízes profundas estão crescendo.

$$w_{revap} = 0$$
 se  $aq_{sh} \le aq_{shthr,rvp}$  Equação 30

$$w_{revap} = w_{revap,mx} - aq_{shthr,rvp}$$
Equação 31

se 
$$aq_{shthr,rvp} < aq_{sh} < (aq_{shthr,rvp} + w_{revap.mx})$$

$$w_{revap} = w_{revap.mx}$$
 Equação 32

se 
$$aq_{sh} \ge (aq_{shthr,rvp} + w_{revap.mx})$$

Sendo:

W<sub>revap</sub>: quantidade de água movendo-se para a zona de solo devido a deficiência de água (mm);

W<sub>revap,mx</sub>: máxima quantidade de água movendo-se na zona de solo em resposta a deficiência de água (mm);

aqsh: quantidade de água armazenada no aquífero raso no começo do dia (mm);

aq<sub>shthr,rvp</sub>: limite do nível de água no aquífero raso para que o revap aconteça (mm).

### Aquífero profundo

A água que entra no aquífero profundo não é considerada no cálculo do balanço de água, não contribuindo para o escoamento da bacia, e pode ser considerada como perdida.

### Unidade de Resposta Hidrológica

As bacias são divididas em múltiplas sub-bacias que são então sub-divididas em unidades de resposta hidrológica (URH). As URH são definidas pelo SWAT em função da combinação das informações de uso, declividade e classe de solo. Cada URH representa uma combinação única dessas informações a fim de facilitar a simulação dos fenômenos físicos que ocorrem nela (MELO NETO, 2013). O escoamento é intencionalmente separado para cada unidade de resposta hidrológica (URH) e direcionado para que seja obtido um valor total de escoamento para a bacia hidrográfica.

As URH não são identificadas espacialmente dentro do SWAT na simulação (GASSMAN et al., 2007). Não há interação entre URH em sub-bacias. Os escoamentos de cada URH são calculados separadamente e depois somadas para determinar as cargas totais da sub-bacia (SWAT, 2011). A rede de drenagem é definida a partir do acúmulo de células que convergem para um mesmo ponto, sempre de cota inferior às células que drenam até ele, onde um valor mínimo é especificado para possibilitar a formação dos canais de drenagem (MELO NETO, 2013).

Com o objetivo de dividir a bacia em estudo em unidades menores que fossem identificadas espacialmente e levando em consideração a interação entre essas unidades identificadas espacialmente para a geração do escoamento, chegou-se a uma resolução espacial de 8 hectares que definiu 10 sub-bacias, cada uma dessas contendo de 5 a 8 URH, totalizando 56 URH.



Figura 9 - Sub-bacias 1 a 10 definidas na bacia JTU2 para modelagem hidrológica.

### 4.2.2 Produção de Biomassa

### Temperatura

A SWAT usa a temperatura base (T\_BASE) para calcular o número de unidades de calor acumuladas todos os dias. A temperatura ótima (T\_OPT) é usada para calcular o estresse de temperatura da planta durante a estação de crescimento. A taxa de aparecimento de folhas é uma função da temperatura.

### <u>Biomassa</u>

A quantidade do crescimento em biomassa potencial de uma planta em um dia é dado por:

$$\Delta bio = RUE \cdot (0.5 \cdot H_{day} \cdot (1 - \exp(-K_l \cdot IAF)))$$
 Equação 33

Sendo:

 $\Delta_{\text{bio}}$ : aumento potencial na biomassa total em um dado dia (kg/ha);

RUE: eficiência do uso de energia da planta (kg/ha·(MJ/m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>);

H<sub>day</sub>: energia solar (MJ. m<sup>-2</sup>),

 $K_l$ : coeficiente de extinção da luz (adimensional);

IAF: índice de área foliar.

4.3 Material cartográfico e dados de campo

Foram utilizadas cartas topográficas vetoriais e modelo digital de elevação disponibilizados por Ochoa-Tocachi et al. (2018).

As características fisico-hídricas do solo foram valores teóricos provenientes de revisão bibliográfica de publicações em regiões nos Andes equatorianos próximas a área de estudo. Seguem abaixo os parâmetros referentes ao solo Andosol.

Tabela 2 – Dados do Andosol de entrada no SWAT.

Descrição	Unidade	Valor
Z - profundidade do solo na camada	mm	3.000
Areia - % de areia do solo em peso	%	28
Silte - % de silte do solo em peso	%	50
Argila - % de argila do solo em peso	%	22
Db - densidade do solo	g.cm <sup>-3</sup>	0,9
AWC - capacidade armazenamento de água no		
solo	mmH2O.mmSolo <sup>-1</sup>	0,37
K - condutividade hidráulica saturada do solo	mm.h <sup>-1</sup>	12
Porosidade	%	58
C - teor de carbono no solo (% de peso do solo)	%	8
K_USLE - fator de erodibilidade do solo	-	0,12
Albedo	%	0,012
Grupo hidrológico	-	С

Fonte: Buytaert et al. (2004), Buytaert et al. (2005), Buytaert et al. (2005), Garcia (2018), Crespo et al. (2006), Crespo et al. (2011), Crespo et al. (2012)

Ochoa-Tocachi et al. (2018) e o projeto de levantamento cartográfico realizado pelo Ministério da Agricultura, Gado, Cultura Aquática e Pesca em escala 1:25.000 definem o solo de toda bacia como Andosol.

As baixas temperaturas, o clima úmido e a baixa pressão atmosférica, característicos de montanha, favorecem a acumulação de matéria orgânica, resultando em solos com grande teor de carbono (C), baixa densidade (Db), considerável capacidade de acumulação de água (AWC) e baixa condutividade hidráulica (K) (Crespo, 2012).

Essa combinação de capacidade de retenção de água, alta porosidade (P) de solo vulcânicos, com a alta quantidade de matéria orgânica, resultam a propriedades

hidrológicas únicas (Buytaert, 2005; Buytaert, 2005).

A composição de Areia, Silte e Argila no solo, o fator de erodibilidade (K\_USLE), o albedo e a definição de grupo hidrológico foram extraídos de publicações referentes a experimentos de campo em bacias equatorianas localizadas no Páramo (Crespo et al., 2006; Crespo et al., 2011; Garcia, 2018).

É importante destacar também que o comportamento da água resulta da combinação das características do solo com sua cobertura, sendo que a alta permeabilidade, indicada pelas variáveis do solo descritas acima, deve ser reduzida nas áreas alagadas.

O SWAT é bastante criterioso na definição dos parâmetros de entrada de cobertura do solo. Foi considerado um manejo adequado das vegetações para os fins da modelagem.

Tabela 3 – Dados de entrada de cobertura do solo referentes ao uso do solo grama, batata e Pinus.

CPNM	BIOE	BIAF	FW1	IAFM1	FW2	IAFM2	DIAF	СМХ	RDMX	то	ТВ	CN2C
ΡΟΤΑ	25	4	0,15	0,01	0,5	0,95	0,6	0,6	0,6	22	7	83
GRAMA	30	2,5	0,05	0,1	0,25	0,7	0,35	1	2	15	0	75
PINE	15	5	0,15	0,7	0,25	0,99	0,99	10	3,5	30	0	70

Sendo: CPNM o tipo de cobertura do solo, BIOE o uso de radiação por tipo de cobertura do solo (MJ/m<sup>2</sup>), BIAF o maior índice de área foliar potencial do dossel e a unidade de superfície projetada no solo (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>), FW1 e FW2 a fração de BIAF correspondente ao respectivamente ao primeiro e segundo ponto na curva ótima de desenvolvimento da área foliar, IAFM1 e IAFM2 a porcentagem de crescimento correspondente ao primeiro e segundo ponto na curva de desenvolvimento da área foliar, IAFM1 e foliar decai, CMX a altura máxima do dossel (m), RDMX a máxima profundidade da raiz (m), TO a temperatura ótima para o crescimento da planta (°C), TB a temperatura mínima para o crescimento da planta (°C) e CN2C o número de curva para o grupo hidrológico C.

Foram utilizados os dados de vazões e informações climatológicas disponibilizados por Ochoa-Tocachi et al. (2018).

4.4 Calibração e Validação do SWAT

Os parâmetros apresentados na Tabela 4 foram utilizados na calibração do modelo considerando informações citadas em publicações de estudos realizados em bacias localizadas nos Andes (Stehr et al., 2010; Rahbeh et al., 2011; Gómez et al., 2013; Omani et al., 2017). São eles:

Parcela/Processo	Parâmetro	Descrição	Unidades
Bacia	SFTMP	Temperatura média do ar onde ocorre chuva no formato de neve	°C
	SMTMP	Temperatura limite para derretimento de neve	°C
Sub-Bacia	CN2	Curva-número inicial para a condição de umidade II	-
	PLAPS	Taxa de variação de chuva	mmH₂0/km
	TLAPS	Taxa de variação de temperatura	°C /km
Solo	ESCO	Coeficiente de compensação de evaporação de água no solo	-
Água no solo	SOL_AWC	Capacidade de armazenamento de água no solo	mmH <sub>2</sub> 0.mmSolo <sup>-1</sup>
Água subterrânea	RCHRG_DP	Coeficiente de percolação do aquífero	-
	REVAPMN	Limite no aquífero raso para revap	mmH₂0
	GW_REVAP	Coeficiente de revap	-
	GWQMN	Limite no aquífero raso para escoamento de base	mmH₂0
	GW_DELAY	Intervalo de tempo para recarga do aquífero	dias

Tabela 4 – Parâmetros calibrados do SWAT.

Fonte: Stehr et al., 2010; Rahbeh et al., 2011; Gómez et al., 2013; Omani et al., 2017

Existiram duas rodadas de calibração. Na primeira, todos os parâmetros descritos acima foram calibrados juntos considerando toda a bacia. Na segunda, apenas o CN foi calibrado por grupo de sub-bacia, considerando 6 grupos que foram definidos baseando-se nas semelhanças entre as declividades das sub-bacias e que estão descritos na Tabela 5 abaixo.

O processo de calibração foi realizado no software SWAT CUP versão 2012 e consiste no ajuste de parâmetros selecionados até que os dados simulados vazão sejam estatisticamente similares aos dados de vazão observados. Na validação, os parâmetros com os valores encontrados na calibração são aplicados a outro trecho da série para validar o processo de simulação. O método de calibração automática utilizado foi o *Sequential Uncertainty Fitting 2* (SUFI-2) que é o método mais utilizado pelos usuários do modelo SWAT e consiste em um método estocástico onde os resultados encontrados são agrupados em pacotes com 95% de probabilidade de ocorrência, tendo como objetivo tanto colocar o maior número de resultados dentro do pacote (o que é avaliado através do fator "P") como ter um valor de pacote o menor possível, isto é, com valores de resultado o mais próximo possível entre eles (o que é avaliado pelo fator "R") (SWAT CUP).

A análise de regressão múltipla é usada para obter a estatística da sensibilidade do parâmetro. O *t-stat* é o coeficiente de um parâmetro dividido pelo seu erro padrão. É a medida da precisão com a qual o coeficiente de regressão é medido. Se um coeficiente é grande comparado ao seu erro padrão, então provavelmente é diferente de 0 e o parâmetro é sensível. Compara-se o *t-stat* de um parâmetro com os valores da tabela de distribuição "t" de Student para determinar o *p-value*. A distribuição "t" de Student descreve como a média de uma amostra com um certo número de observações deve se comportar. O *p-value* para cada termo testa a hipótese nula de que o coeficiente é igual a zero (sem efeito). Um valor p baixo (o *p-value* <0,05) indica que a hipótese nula pode ser rejeitada. Em outras palavras, um parâmetro que tem um *p-value* baixo deve trazer um acréscimo significativo ao modelo porque mudanças no valor do parâmetro está relacionada a mudanças na resposta da variável. Por outro lado, um *p-value* alto sugere que mudanças no parâmetro não estão associadas a mudanças na resposta, isto é, o parâmetro não é sensível.

48

O período de 01 de janeiro de 2015 a 31 de outubro de 2016 foi utilizado para calibração e o de 01 de janeiro de 2014 a 31 de dezembro de 2014 foi utilizado para validação, ambos com passo diário. Esses foram os períodos que apresentaram melhores valores para calibração e validação.

Os parâmetros descritos na Tabela 4 foram calibrados pelo método de calibração automática SUFI-2, e para cada um deles foi proposto um intervalo inicial de valores conforme indicado por publicações em bacias nos Andes equatoriano (Stehr et al., 2010; Rahbeh et al., 2011; Gómez et al., 2013; Omani et al., 2017). Os parâmetros que ajustam a ocorrência de neve (SFTMP e SMTMP) foram calibrados e resultaram na não existência de neve, conforme reportado por Buytaert et al. (2004). Os parâmetros que apresentaram sensibilidade significativa, isto é, "valor-p" menor que 0,05 foram: CN2, TLAPS e SMTMP. Para estes, intervalos menores de valores foram testados, considerando que o SUFI 2 trabalha com mínimos e máximos locais e os resultados da calibração se encontram descritos no Anexo A.

Foram aplicadas tanto na calibração quanto na validação as seguintes estatísticas de precisão: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), Pbias (KUMAR, 2008) e coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) (LEGATES; MACCBE, 1999):

$$NSE = \frac{\sum_{i}^{n} (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^{2}}{\sum_{i}^{n} (Q_{obs,i} - Q^{med}_{obs})^{2}}$$
Equação 34

Pbias = 
$$1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} Q_{sim,i} - Q_{obs,i}}{\sum_{i=1}^{n} Q_{obs,i}}\right)$$
. 100% Equação 35

$$r^{2} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_{obs,i} - Q^{med}_{obs}). \quad (Q_{sim,i} - Q^{med}_{sim})}{\sum_{i=1}^{n} \sqrt{(Q_{obs,i} - Q^{med}_{obs})^{2} \cdot (Q_{sim,i} - Q^{med}_{sim})^{2}}}\right]^{2}$$
Equação 36

Sendo:

Q<sub>sim,i</sub>: vazão simulada no dia i (m³/s);

Q<sub>obs,i</sub>: vazão observada no dia i (m<sup>3</sup>/s);

Q<sup>med</sup> sim: média das vazões diárias simuladas (m<sup>3</sup>/s);

Q<sup>med</sup> obs: média das vazões diárias observadas (m<sup>3</sup>/s).

Moriasi et al. (2007) definiu diretrizes para avaliação dos modelos hidrológicos distribuindo os valores dos coeficientes Nash-Sutcliffe (NSE) e Pbias em quatro categorias (insatisfatório, satisfatório, bom e muito bom), conforme Tabela 5.

Desempenho	NSE	PBIAS (%)			
Muito bom	0,75 <nse<1,00< td=""><td>PBIAS&lt;±10</td></nse<1,00<>	PBIAS<±10			
Bom	0,65 <nse≤0,75< td=""><td>±10<pbias<±15< td=""></pbias<±15<></td></nse≤0,75<>	±10 <pbias<±15< td=""></pbias<±15<>			
Satisfatório	0,50 <nse≤0,65< td=""><td>±15<pbias<±25< td=""></pbias<±25<></td></nse≤0,65<>	±15 <pbias<±25< td=""></pbias<±25<>			
Insatisfatório	NSE≤0,50	PBIAS>±25			

Tabela 5 – Avaliação do desempenho de modelos a partir dos coeficientes NSE e PBIAS.

Fonte: Moriasi et al. (2007).

O NSE é um índice estatístico que representa, principalmente, a resposta do modelo na simulação de vazões de pico. O Pbias representa, em termos percentuais, a tendência de desvio das vazões simuladas em relação às observadas. O Coeficiente de Determinação (R<sup>2</sup>) tem sido bastante empregado na avaliação do desempenho de modelos hidrológicos devido à sua sensibilidade em identificar diferenças entre valores extremos das séries observada e simulada.

A grande pressão antrópica que a vegetação natural do Páramo sofre indica que, caso a bacia JTU2 não estivesse no escopo de atuação da FONAG, onde foi isolada e submetida a regeneração natural por quase 10 anos, sua cobertura natural poderia ser substituída pelas culturas:

- plantação de batata;
- reflorestamento com Pinus.

Essas duas coberturas do solo foram os dois cenários adicionais simulados no SWAT. Nesses cenários, a parcela da bacia coberta por gramínea no cenário de linha de base, que equivale a 49% da área total da bacia, foi substituída por plantação de batata (que foi chamado de cenário POTA) e por reflorestamento com Pinus (que foi chamado de cenário PINUS), enquanto a parcela da bacia coberta por áreas alagadas, que representa 51% da área total da bacia, não teve alteração, permanecendo igual ao cenário de linha de base. O cenário de linha de base, que é a regeneração natural da gramínea natural do Páramo, foi chamado de GRAMA.

Os dados de entrada dos três tipos de vegetação foram os disponíveis no banco de dados do modelo SWAT, conforme Tabela 3. A gramínea simulada no cenário de linha de base resultou da combinação entre *Tal fescue* (por ser um tipo de grama que se desenvolve em baixas temperaturas) e *Grasses* (por apresentar geometria semelhante a gramínea do Páramo).

### 4.6 Análises complementares

### Variáveis do ciclo hidrológico

Considerando-se os dados diários de saída do SWAT, foram estimadas as parcelas do ciclo hidrológico evapotranspiração, escoamento (superficial e básico) e infiltração, para o cenário de linha de base (GRAMA), de plantação de batata (POTA) e reflorestamento com Pinus (PINE). As parcelas foram agrupadas anualmente para os cenários de uso do solo e comparadas entre si.

### Curva de permanência do escoamento

Partindo-se dos dados diários de escoamento para o cenário de linha de base (GRAMA), de plantação de batata (POTA) e reflorestamento com Pinus (PINE), estes foram ordenados em ordem decrescente, desde o maior valor da série de registros até o menor. Calculou-se então a probabilidade de ocorrência de uma vazão igual ou maior para cada uma das vazões consideradas, convertendo-se em seguida a probabilidade para valores percentuais. Os dados foram então plotados em um gráfico para cada cenário, no qual no eixo Y dispuseram-se as vazões diárias e no eixo X as probabilidades em %. Este procedimento resultou no traçado da curva de permanência ou de duração, que é utilizada quando se deseja conhecer a permanência no tempo de determinados valores. Os formatos das curvas de permanência para os diferentes cenários de uso do solo foram comparados entre si.

### <u>Q95, Q90, Q50 e Q10</u>

A partir da curva de permanência para o cenário de linha de base (GRAMA), de cultivo de batata (POTA) e reflorestamento com Pinus (PINE), foi identificado o escoamento com probabilidade de 95% de ocorrência Q<sub>95</sub>, com probabilidade de 90% de ocorrência Q<sub>90</sub>, com probabilidade de 50% de ocorrência Q<sub>50</sub> e com a probabilidade de 10% de ocorrência Q<sub>10</sub> para os diferentes cenários de uso do solo que foram comparados entre si.

# Geração de serviço ecossistêmico hidrológico

Tendo como base o manual de Indicador de Alteração Hidrológica (IHA) da *The Nature Conservancy* (TNC, 2009), foi avaliado o impacto dos diferentes regimes de vazões gerados pelos cenários GRAMA, POTA e PINUS na geração de serviço ecossistêmico hidrológico.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Calibração e validação do modelo

Nos dois processos, validação e calibração, foram utilizados os resultados que apresentaram melhor eficiência estatística e valores dos parâmetros mais próximo da realidade física da bacia (Buytaert et al. (2004), Buytaert et al. (2005), Buytaert et al. (2005), Garcia, (2018), Crespo et al. (2006), Crespo et al. (2011), Crespo et al. (2012).

Considerando que os CN's de umidade II contidos nas tabelas do banco de dados do SWAT são considerados apropriados para 5% de declividade e que a declividade média da bacia é 22%, avaliou-se a distribuição das declividades das 10 sub-bacias (identificadas abaixo de SB1 a SB10), considerando a porcentagem da área da bacia cuja declividade está entre 0 e 13%, 13,1% e 26% e 26,1% a 99%. As 10 sub-bacias foram então agrupadas de acordo com semelhanças na distribuição das declividades, que estão descritas na Tabela 6. Esses grupos (identificados abaixo de G1 a G6) foram então novamente calibrados e os resultados estão descritos na Tabela 11.

	G1	G	62	G	3	C	G4	G5	G	6
Declividade	SB1	SB2	SB8	SB3	SB5	SB4	SB10	SB6	SB7	SB9
0% - 13%	39%	86%	68%	12%	2%	44%	41%	24,5%	7%	9%
13,1% - 26%	20%	14%	32%	26%	27%	36%	48%	51%	50%	46%
26,1% - 99%	40%	-	-	62%	71%	20%	11%	24,5%	43%	45%

Tabela 6 – Distribuição da declividade nas 10 sub-bacias nos 6 grupos.

Considerando o ajuste dos valores dos CNs aplicados na primeira fase da calibração, onde todos os parâmetros foram calibrados simultaneamente, e a segunda fase, onde o CN foi calibrado por grupo de bacias, os valores sofreram ajustes entre

+23% e -30% (conforme descrito no Anexo A). O manual do SWAT recomenda um ajuste entre -25% e +25%. Considerando que apenas que o Grupo 4 teve um ajuste fora desse intervalo, o resultado foi considerado adequado.

A análise visual das curvas de vazão simulada mostra satisfatório ajuste com as curvas de vazão observada, tanto no período de calibração quanto no período de validação (Figura 10). Pode-se perceber pelos gráficos que as ascensões e recessões do hidrograma foram satisfatoriamente representados. Os menores valores de vazões simuladas foram mais próximos dos valores das vazões observadas, o que ocorre nos períodos mais secos.



Figura 10 - Comparação entre o volume de chuva P, as vazões estimadas Qest e as vazões medidas Qmed no período de calibração e validação.

Moriasi et al. (2007) define critérios de classificação onde tanto o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe como o Pbias devem ter bom resultado, definindo faixas de valores para os dois índices, conforme descrito na Tabela 7, a partir dos quais o desempenho de modelos serão classificados como insatisfatório, satisfatório, bom e muito bom. Assim, segundo esta classificação, a modelagem apresentada teria desempenho insatisfatório, apesar de ter NSE igual a 0,47, muito próximo de 0,5 que é o valor a partir do qual a simulação passa a ser considerada como satisfatória, e Pbias igual a 0,8%, dentro do intervalo de melhor classificação, isto é, entre -10% e 10% que é o intervalo dentro do qual a simulação é considerada com desempenho muito bom. Já a validação atende aos critérios mínimos dos dois índices, sendo

considerada satisfatória pelo fato do valor do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe ser superior a 0,5 e pelo valor do Pbias estar entre -25% e 25%, isto é, apresentando valor igual a 0,57 para o primeiro índice e -0,8 para o segundo índice. Além dos índices utilizados por Moriasi et al. (2007), o Coeficiente de Determinação R<sup>2</sup> apresentando valor igual a 0,48 para a calibração e valor igual a 0,64 para a validação. Em simulações hidrológicas realizadas em micro bacias nos Andes com o modelo SWAT, Quintero et al. (2009) obtiveram coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe igual a 0,03 e coeficiente de determinação R<sup>2</sup> igual a 0,93 considerando todo o período simulado; Espinosa e Rivera (2016) obtiveram coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe igual a 0,59 durante a calibração e 0,53 durante a validação e coeficiente de determinação R<sup>2</sup> igual a 0,86 durante a validação e validação.

Conforme já mencionado, a análise visual indicou melhor aderência entre a curva de vazões observadas e a curva de vazões simuladas quando estas variáveis apresentam valores menores, o que ocorre nos períodos mais secos. Considerando que as séries históricas de vazão e chuva disponíveis são de um período de três anos, os valores mensais de chuva foram acumulados de 2014 a 2016 e comparados em relação a mediana, para avaliar a diferença entre meses chuvosos e secos, conforme indicado na Figura 11.



Figura 11 - Distribuição da chuva mensal acumulada entre 2014 e 2016 e a mediana dos valores.

Os meses de janeiro, fevereiro, julho, agosto, setembro e dezembro tiveram valores de chuva acumulada de três anos inferiores a mediana, e para as vazões observadas e as vazões simuladas nesses meses nos anos de 2014, 2015 e 2016 foram calculados novamente o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, o Pbias e o Coeficiente de Determinação R<sup>2</sup>.

Avaliação do desempenho	Calibração 2015 - 2016	Validação 2014	Período seco
NSE	0,47	0,57	0,93
PBIAS (%)	0,8	-0,8	20,0
R <sup>2</sup>	0,46	0,59	0,54

Tabela 7 – Resultado de desempenho a partir dos coeficientes NSE, PBIAS e R<sup>2</sup>.

Considerando o período seco, o valor calculado do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe melhora muito, isto é, é igual 0,93, ficando entre 0,75 e 1 que é o intervalo dentro do qual a simulação é considerada com desempenho muito bom. O valor do Pbias é igual a 20%, ficando entre -25% e 25%, que é o intervalo dentro do qual a simulação é considerada satisfatória. E o valor do coeficiente de determinação R2 é igual a 0,54. Quintero et al. (2009) reportaram melhora no coeficiente de determinação como resultado 0,96 e 0,97 simultaneamente.

Assim, levando em consideração o resultado dos três indicadores (coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, Pbias e coeficiente de determinação R<sup>2</sup>) nos três períodos avaliados e a comparação com os resultados de modelagens realizadas com o SWAT em micro bacias nos Alpes andinos, a calibração e validação foram consideradas satisfatórias.

5.2 Simulação dos cenários e impactos na provisão de serviços ecossistêmicos hidrológicos

Após a calibração, o cenário de linha de base de regeneração natural de grama (GRAMA) cuja cobertura corresponde a 49% da área total da bacia foi então substituído por duas culturas muito comuns na região e introduzidas de forma antrópica, a plantação de batata (cenário POTA) e o reflorestamento com Pinus (cenário PINE). A área alagada, que corresponde a 51% da área total da bacia, permaneceu inalterada.

Os dados diários do escoamento superficial e do escoamento básico foram agregados para se obter o escoamento total anual apresentado na Tabela 8 e na Tabela 9. O método utilizado no modelo SWAT parte do adimensional número de curva CN para o cálculo do escoamento superficial. O solo Andosol foi classificado como grupo hidrológico C e partindo-se dos valores iniciais de CN para os tipos de cobertura vegetal batata e pinus descritos no banco de dados do modelo (conforme Anexo A), foram realizados os ajustes referentes às duas rodadas de calibração.

O equacionamento proposto pelo método do número de curva não leva em consideração a parte da chuva que é interceptada pelo dossel da planta na estimativa do escoamento direto. A interceptação é incorporada na abstração inicial, em conjunto com a água evapotranspirada, infiltrada e retida nas depressões da superfície, e representa todas as perdas antes que o escoamento superficial inicie. Em contrapartida, o tipo de vegetação é o dado de entrada para definição do valor do CN, onde a batata apresenta o maior valor, a grama o segundo maior valor e o Pinus o menor valor (conforme Tabela 3). Apesar do valor do CN ter sido calibrado por grupo de sub-bacias, dentro do mesmo grupo que é composto pelas sub-bacias com declividades semelhantes, a ordenação dos valores do CN para grama, batata e Pinus se mantém. Já o escoamento básico, que é a parte do escoamento proveniente do solo, será composto pela quantidade de fluxo lateral e de fluxo subterrâneo (e as raízes). Os valores de escoamento médio anual estão de acordo com a ordenação do CN, sendo  $Q_{POTA} = 67,58$  mm/ano,  $Q_{GRAMA} = 67,25$  mm/ano e  $Q_{PINE} = 61,01$  mm/ano. Ou seja, o reflorestamento com Pinus diminuiu o escoamento em 9,3% e o cultivo de batata manteve o escoamento quase estável, com um pequeno aumento de 0,5%,
conforme Tabela 9. A relação do escoamento em relação a quantidade de água precipitada é menor quando a cobertura do solo é Pinus (7%), apresentando valores iguais (7,7%) quando há cobertura de grama e batata, conforme Tabela 9. Ou seja, o reflorestamento com Pinus diminui a geração de escoamento.

A evapotranspiração foi calculada por Penman-Monteith, sendo considerada a evaporação de toda a precipitação interceptada pelo dossel. As diferentes coberturas do solo grama, batata e Pinus têm também diferentes morfologias e densidades, levando a diferentes resultados de evapotranspiração. A temperatura média mensal máxima registrada na região estudada foi 11°C e a temperatura média mensal mínima 1,5°C, favorecendo o crescimento de batata (t<sub>opt</sub> = 20°C e t<sub>base</sub> = 7°C) e grama (t<sub>opt</sub> = 15°C e t<sub>base</sub> = 0°C) em detrimento ao crescimento de Pinus (t<sub>opt</sub> = 30°C e t<sub>base</sub> = 0°C).

A temperatura irá determinar o crescimento e produção de biomassa, que depende da temperatura e do índice de área foliar máximo de cada vegetação. Considerando que a batata tem IAF<sub>máx</sub> igual a 4, a grama tem IAF<sub>máx</sub> igual a 2,5 e o Pinus tem IAF<sub>máx</sub> igual a 6, e combinando esse fator a temperatura para a produção de biomassa, obtêm-se os valores indicados na Tabela 8, onde a batata teve a segunda maior produção de biomassa e segundo IAF<sub>médio</sub> produzido (BIOM<sub>POTA</sub> = 140.10<sup>3</sup> t/ano e IAF<sub>POTAmédio</sub> = 0,726), a grama teve a maior produção de biomassa e menor IAF<sub>médio</sub> (BIOM<sub>GRAMA</sub> = 150.10<sup>3</sup> t/ano e IAF<sub>GRAMAmédio</sub> = 0,234) que foi bastante inferior ao das duas outras vegetações, e o Pinus teve a menor produção de biomassa, bem inferior as demais, porém o maior IAF<sub>médio</sub> (BIOM<sub>PINE</sub> = 79.10<sup>3</sup> t/ano e IAF<sub>PINEmédio</sub> = 0,904). Ou seja, apesar da grande produção de grama em massa, seu IAF<sub>médio</sub> é consideravelmente inferior devido a geometria de sua folha. Em contrapartida, o Pinus teve baixa produção de biomassa, porém sua geometria fez com que apresentasse o maior IAF<sub>médio.</sub> A evapotranspiração média anual acompanhou o desempenho do IAF<sub>médio</sub> dessas culturas, confirmando a relação da área do dossel com a evapotranspiração, onde a ETPOTA = 413 mm/ano, ETGRAMA = 377,17 mm/ano e ETPINE = 417,44 mm/ano. Ou seja, o reflorestamento com Pinus aumentou a evapotranspiração em 10,7% e o cultivo de batata aumentou a evapotranspiração em 9,5%, conforme Tabela 9.

A infiltração foi então estimada pela diferença entre a precipitação e o escoamento e a evapotranspiração, resultando em uma maior infiltração para a grama

e valores muito próximos de infiltração para batata e Pinus, o que indica que o maior valor de escoamento da batata é compensado pelo maior valor de evapotranspiração do Pinus, sendo IPOTA = 392,86 mm/ano, IGRAMA = 429,02 mm/ano e IPINE = 394,87 mm/ano. Ou seja, a maior infiltração acontece quando a cobertura do solo é a vegetação natural, sendo a infiltração uma parcela significativa quando comparada a precipitação nos três cenários de cobertura do solo, variando entre 45,0% e 49,1%, conforme Tabela 8.

	Р	Q	Qb	ET		BIOM	IAF
	(mm/ano)	(mm/ano)	(mm/ano)	(mm/ano)	(mm/ano)	(t/ano)	(médio)
POTA		67,58	49,35	413,00	392,86	140.063	0,726
	072 11						
GRAMA	073,44	67,25	51,56	377,17	429,02	150.858	0,234
PINE		61.01	50,11	417.56	394.87	79.208	0,904

Tabela 8 - Resultado das parcelas ciclo hidrológico, biomassa e índice de área foliar.

Sendo: Precipitação média anual P, Escoamento médio anual Q, Escoamento de base médio anual Qb, Evapotranspiração média anual ET, Infiltração média anual I, Biomassa média anual BIOM e Índice de área foliar médio IAF nos cenários grama (GRAMA), batata (POTA) e Pinus (PINE).

Considerando a comparação entre o escoamento básico e o escoamento total, o reflorestamento com Pinus aumenta a parcela do escoamento básico (igual a 82,1%) e o cultivo de batata diminui a parcela do escoamento básico (igual a 73,0%), quando comparados em relação a cobertura do solo grama que é o cenário de linha de base (igual 76,7%), conforme Tabela 9.

Os valores de evapotranspiração média anual em relação aos valores de precipitação média anual são iguais a 47,3% para cultivo de batata, 43,2% para a cobertura do solo grama e 47,8% para o reflorestamento com Pinus. Considerando que a temperatura média local é baixa, isto é ...., buscou-se comparar esses resultados ao de publicação de experimentos em áreas próximas a bacia de estudo. Buytaert et al. (2007) encontraram uma relação de evapotranspiração em relação a precipitação igual a 27%, 81% e 38% para grama, Pine e cultivo de batata respectivamente, em bacias com altitudes e temperaturas semelhantes a bacia

estudada.

	<b>∆</b> Q %	<b>∆</b> ET %	<b>∆</b> I %	Q/P %	Qb/Q %	I/P %	ET/P %
ΡΟΤΑ	0,5	9,5	-9,2	7,7	73,0	45,0	47,3
GRAMA	-	-	-	7,7	76,7	49,1	43,2
PINE	-9,3	10,7	-8,0	7,0	82,1	45,2	47,8

Tabela 9 - Variação e relação das variáveis do ciclo hidrológico.

Sendo: Variação do Escoamento médio anual Q, Evapotranspiração média anual ET e Infiltração média anual I, nos cenários batata (POTA) e Pinus (PINE) versus o cenário grama (GRAMA). Relação entre o Escoamento médio anual Q, a Infiltração média anual I, a Evapotranspiração média anual ET e a Precipitação média anual P; o Escoamento de base médio anual Qb e o Escoamento médio anual Q nos cenários grama (GRAMA), batata (POTA) e Pinus (PINE).

Analisando o comportamento da curva de permanência, apesar das curvas dos três cenários apresentarem comportamentos muito semelhantes e se sobreporem em alguns momentos, a cultura de batata gera redução dos escoamentos menores e aumento dos escoamentos maiores, em relação às duas outras coberturas do solo. A grama e o Pinus têm comportamento semelhante em relação aos escoamentos maiores, e a grama tem escoamentos mínimos maiores que a batata e o Pinus, conforme Figura 12.



Figura 12 - Curva de permanência do Escoamento diário Q nos cenários POTA, GRAMA e PINE.

Os mesmos resultados podem ser observados quando se compara as  $Q_{95}$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_{50}$  e  $Q_{10}$  do escoamento médio diário (Q) dos cenários cultivo de batata e reflorestamento com Pinus em relação a gramínea. Existem variações entre as  $Q_{95}$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_{50}$  dos cenários de cultivo de batata e reflorestamento com Pinus em relação a cobertura com grama. O cultivo de batata apresenta maior redução em relação a  $Q_{95}$  e a  $Q_{90}$  da cobertura com grama, isto é, redução de -9,6% e -9,7% respectivamente, enquanto o reflorestamento com Pinus apresenta a menor redução em relação a  $Q_{50}$  cobertura com grama, isto é, redução de -3,7%. O cultivo de batata apresenta aumento significativo de 25% em relação a  $Q_{10}$  da cobertura com grama, enquanto o reflorestamento com Pinus apresenta pequena redução em relação a  $Q_{10}$  da cobertura com grama, isto é, conforme Tabela 10.

	Q <sub>95</sub> (mm/dia)	Δ	Q <sub>90</sub> (mm/dia)	Δ	Q₅₀ (mm/dia)	Δ	Q <sub>10</sub> (mm/dia)	Δ
ΡΟΤΑ	0,0171	-9,6%	0,0282	-9,7%	0,1155	-3,3%	6,5075	25%
GRAMA	0,0190	-	0,0312	-	0,1195	-	5,2057	-
PINE	0,0185	-2,5%	0,0295	-5,8%	0,1150	-3,7%	5,0335	-3,3%

Tabela 10 – Valores de  $Q_{95}$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_{50}$  e  $Q_{10}$  e variações nos cenários POTA e PINE em relação a linha de base GRAMA.

Em experimento realizado por Crespo et al. (2011), constatou-se através do monitoramento de 13 microbacias no Andes equatoriano que a vazão é basicamente composta por escoamento básico, o que está de acordo com os resultados obtidos na modelagem hidrológica onde o escoamento básico médio anual equivale de 73% a 82,1% do escoamento total médio anual nos três cenários simulados (grama, batata e Pinus), conforme indicado na Tabela 9.

Em experimentos realizados em microbacias pareadas nos Andes equatorianos cobertas por Andosol e com áreas entre 0,84 km<sup>2</sup> e 5,01 km<sup>2</sup>, com altitudes e formatos semelhantes entre si, próximas geograficamente, com o objetivo de reduzir diferenças climáticas e área de precipitação, Crespo et al. (2010) constataram que os reflorestamentos com Pinus produzem uma diminuição no escoamento anual como consequência do aumento da evapotranspiração; e que o principal impacto do cultivo de batata é um grande aumento na magnitude dos fluxos de pico e uma redução dos fluxos de base, que estão de acordo com os resultados da simulação hidrológica realizada.

Buytaert et al. (2004) descrevem a alta capacidade de retenção de água do Andosol e destacam que esse solo serve como o mais importante reservatório de água para a densamente povoada região inter-Andina, o que foi comprovado nos três cenários de uso do solo testados nas simulações, onde a infiltração média anual corresponde a 45,0%, 45,2% e 49,1% da precipitação média anual (conforme Tabela 9). O valor de 216 dias encontrado na calibração (conforme indicado no Anexo A) para o parâmetro *Intervalo de tempo para recarga do aquífero* (GW\_DELAY) indica o longo tempo de detenção de água no solo, que foi também verificado por Buytaert et al. (2005) através da conclusão de que o Páramo possui uma resposta hidrológica lenta e uma grande capacidade de regular os fluxos de água. Em experimento de

monitoramento de bacia com 2 km<sup>2</sup> e modelagem hidrológica, Buytaert et al. (2004) concluíram que nas bacias onde houve cultivo de batata, a liberação da água pelo solo é maior, isto é, o escoamento básico é menor. Crespo et al. (2012), em modelagem hidrológica em microbacias, também verificaram a importância do escoamento básico no abastecimento de água da região andina do Equador.

Buytaert et al. (2007), em experimentos de substituição da vegetação natural por reflorestamento com Pinus e cultivo de batata em micro-bacias de 0,9 km<sup>2</sup> a 2,5 km<sup>2</sup> em altitudes entre 3230 m e 3810 m nos Andes equatoriano, verificaram que o reflorestamento com Pinus reduz o escoamento em até 50%, enquanto o cultivo de batata mantém o escoamento próximo ao observado com cobertura natural, porém gera redução do escoamento de base. Os resultados reportados por Buytaert et al. (2007) estão em linha com os resultados da modelagem hidrológica realizada, porém as magnitudes são diferentes quando se leva em consideração os resultados com reflorestamento com Pinus. A altitude da bacia JTU2 é bastante elevada, entre 4.085 m e 4.322 m. Considerando a variação da temperatura com a altitude, onde conforme o parâmetro calibrado TLAPS (Anexo A) a temperatura diminui 3ºC a cada quilômetro de altitude, caso a bacia JTU2 estivesse em altitudes menores, a temperatura seria mais favorável a produção de biomassa, acentuando assim sua evapotranspiração e redução de escoamento, conforme o reportado por Buytaert et al. (2007) e Ponette-Gonzalez et al. (2014), que verificaram que o reflorestamento de bacias nos Alpes reduziu consideravelmente o escoamento anual devido ao aumento da evapotranspiração.

Apesar do aumento da evapotranspiração e consequente diminuição do escoamento no cenário com reflorestamento com Pinus, a magnitude da redução do escoamento total, de -9,3%, é inferior aos reportados por Farley et al. (2005), que verificou redução radical de escoamento anual quando a área reflorestada é maior que 20% da área total, em pequenas bacias hidrográficas com escoamento anual inferior a 10% da precipitação anual, que também ocorre nessa simulação hidrológica.

Além da potencial interferência da altitude na geração de biomassa no cenário de reflorestamento com Pinus, onde numa condição mais favorável ao crescimento dessa cultura se teria maiores valores de evapotranspiração e que resultaria em redução das vazões mínimas, como foi verificado por Andréassian (2014), é

importante destacar que os diferentes cenários variaram o uso da terra em apenas 49% da bacia, uma vez que o restante dos 51% da cobertura do solo por ser composto por áreas alagadas, se manteve inalterado. Caso toda a área da bacia tivesse sofrido alteração, provavelmente a magnitude das variações dos cenários de cultura de batata e reflorestamento com Pinus em relação ao cenário de linha de base gramínea teriam sido maiores.

Assim, o uso de modelagem hidrológica explicita as relações causais tácitas e testa hipóteses subjacentes (QUITERO et al., 2009), além de ser imprescindível que se vá além de generalizações e se considere as características estruturais e ecológicas da cobertura de terra e do local (PONETTE-GONZALEZ et al., 2014) para que se obtenha resultados consistentes que possam guiar tomadas de decisão em relação a implementação de diferentes usos da terra, conforme os benefícios que se pretende alcançar.

No estudo de caso apresentado, a conservação implementada na bacia JTU2, que promoveu a regeneração natural de gramínea (o Páramo), resultou em maiores valores de Q<sub>95</sub>, Q<sub>90</sub> e Q<sub>50</sub> quando comparado aos outros dois cenários, apesar dos cenários cultivo de batata e reflorestamento com Pinus apresentarem reduções pouco significativas, isto é, -3,3% e -9,7%, favorecendo assim o abastecimento de água para a cidade de Quito, que é o objetivo do fundo de água FONAG. Os programas de promoção de serviços ecossistêmicos nos Andes têm como objetivo principal a manutenção de vazão em estações secas e retenção de sedimento (QUINTERO, 2009).

Avaliando-se o padrão de escoamento diário nas curvas de permanência dos três tipos de vegetação, apesar das curvas dos três cenários apresentarem comportamentos muito semelhantes e se sobreporem em alguns momentos, o cenário GRAMA é o que apresenta menor variação entre os escoamentos máximos e mínimos, com valores máximos menores e valores mínimos maiores, enquanto o cenário POTA é o que apresenta maior variação entre os escoamentos máximos e mínimos, com maiores valores máximos e menores valores mínimos. Considerando-se o potencial impacto na alteração do cenário natural que é a gramínea característica do Páramo, para o cenário que apresentou a maior alteração nas vazões máximas e mínimas, que foi o cultivo de batata, em uma abordagem ecossistêmica, avalia-se que

65

a redução nas vazões mínimas favorece a eliminação de espécies invasivas introduzidas em comunidades aquáticas e ribeirinhas e concentra presas em áreas limitadas para beneficiar predadores. Em contrapartida, as variações sazonais das vazões mínimas de um rio impõem uma restrição fundamental nas comunidades aquáticas de um rio porque determina a quantidade de habitat aquático disponível durante a maior parte do ano, o que tem uma forte influência na diversidade e número de organismos que podem viver no rio. Assim, apesar dos potenciais benefícios indicados, como eliminação de espécies invasivas, parte da biota local pode ter deixado de existir por não ter suportado o novo regime de vazões médias mais baixas, considerando também que aspectos qualitativos da água, como temperatura e oxigênio dissolvido, podem se tornar ainda mais críticos nessa condição.

O aumento de vazões máximas colabora para o ajuste da forma física do canal, incluindo piscinas e corredeiras, determinando o tamanho dos substratos em fluxo (como areia e cascalho), evitando a invasão da vegetação ribeirinha no corpo d'água, restaurando as condições normais de qualidade da água depois de fluxos baixos prolongados, contribuindo com o desaparecimento de resíduos e poluentes e na manutenção de condições de salinidade adequadas em estuários. Em contrapartida, algumas populações podem ser dizimadas nessa condição (TNC, 2009).

Ou seja, as diferentes coberturas do solo da bacia favorecem o ecossistema local de diferentes formas. Na situação avaliada, a alteração do Páramo (gramínea) para cultivo de batata pode alterar as características do ecossistema natural, eliminando algumas formas de vida, porém favorecendo o desenvolvimento de outros novos seres vivos. Assim, é necessário que se avalie as condições locais e os potenciais impactos das vazões mínimas, médias e máximas considerando os resultados que se pretende alcançar no ecossistema como um todo.

## 6. CONCLUSÃO

A metodologia apresentada neste estudo forneceu informações relevantes para possibilitar a avaliação dos impactos dos diferentes usos do solo gramínea (característico do Páramo), cultivo de batata e reflorestamento com Pinus nas parcelas do ciclo hidrológico.

O modelo SWAT foi capaz de representar de forma satisfatória a dinâmica e processos físicos simulados de uma bacia hidrográfica nos Andes equatoriano através de calibração e validação, com NSE igual a 0,47 e Pbias igual a 0,8% na calibração e com NSE igual a 0,57 e Pbias igual a -0,8% na validação. Houve aderência muito boa dos menores valores de escoamento simulados em relação aos valores observados, conforme foi verificado pelo valor do NSE igual a 0,93 e Pbias igual a 20% considerando os meses secos, isto é, aqueles cujos valores de chuva mensal acumulada nos três anos analisados foram inferiores a mediana desses valores. A boa aderência dos valores no período seco trouxe robustez aos resultados obtidos para a avaliação do impacto da ação de conservação em comparação aos outros dois cenários, cultura de batata e reflorestamento com Pinus, considerando a contribuição para o abastecimento de água de Quito que é o objetivo do fundo de água FONAG.

Os resultados das simulações dos cenários regeneração natural com gramínea, cultura de batata e reflorestamento com Pinus estão de acordo com experimentos realizados em microbacias nos Andes equatorianos, onde constatou-se que a batata gera um escoamento médio similar a gramínea (igual a 67,58 mm/ano e 67,25 mm/ano respectivamente), apesar de diminuir o escoamento mínimo (sendo Q<sub>95</sub> da batata igual 0,0171 mm/dia e Q<sub>95</sub> da grama igual 0,0190 mm/dia; o Q<sub>90</sub> da batata igual 0,0282 mm/dia e Q<sub>90</sub> da grama igual 0,0312 mm/dia) e aumentar o escoamento máximo quando comparado ao cenário de linha de base gramínea (sendo Q<sub>10</sub> da batata igual 6,5075 mm/dia e Q<sub>10</sub> da grama igual 5,2057 mm/dia). A batata também gera redução do escoamento de base em relação ao cenário de linha de base (sendo Q<sub>b</sub> da batata igual q 49,35 mm/ano e Q<sub>b</sub> da grama igual a 51,56 mm/ano). O reflorestamento com Pinus levou a redução do escoamento médio e aumento da evapotranspiração em relação ao cenário de linha de base gramínea (a endo Q de Pinus igual a 61,01 mm/ano e da gramínea igual a 67,25 mm/ano; e ET de Pinus igual a 417,56 mm/ano e da

67

gramínea igual a 377,17 mm/ano), apesar da redução do escoamento médio e do aumento da evapotranspiração terem acontecido em magnitude inferior ao verificado em experimentos na mesma região. Isto pode ser explicado devido à grande altitude da bacia hidrográfica estudada, onde as temperaturas locais devem ter dificultado o desenvolvimento do Pinus. As simulações corroboraram com os resultados de experimentos e relatos sobre a importância do solo Andosol como mais importante reservatório de água para a densamente povoada região inter-Andina. Assim concluise que o modelo SWAT também foi capaz de representar de forma satisfatória os três cenários de uso do solo simulados, apesar das variações das Q<sub>95</sub>, Q<sub>90</sub>, Q<sub>50</sub> dos cenários cultivo de batata e reflorestamento com Pinus em relação ao uso do solo grama serem pouco significativas, isto é, tendo redução máxima igual a -9,7%. Apenas em relação a Q<sub>10</sub> houve variação significativa, onde o cultivo de batata apresentou aumento de 25% em relação a cobertura com grama.

Considerando os diferentes resultados encontrados na literatura sobre os impactos no regime hidrológico e nas dinâmicas de vazões médias, máximas e mínimas, é imprescindível que se vá além de generalizações e se considere as características estruturais e ecológicas da cobertura de terra e do local para que se obtenha resultados consistentes que possam guiar as tomadas de decisão em relação a implementação de diferentes usos da terra, conforme os benefícios que se pretende alcançar.

Quando se leva em consideração os impactos dos diferentes regimes de escoamento numa abordagem mais ampla, as diferentes vegetações geram serviços ecossistêmicos de diferentes formas, sendo que usos do solo provenientes de atividades antrópicas são capazes de gerar impactos positivos no ecossistema e para os diferentes seres vivos. Assim, a definição da provisão de serviços numa abordagem ecossistêmica é extremamente complexa, o que reforça a necessidade de se entender o contexto local e os processos físico-quimicos localmente para que as mudanças no uso do solo implementadas alcancem os resultados planejados. Os modelos hidrológicos são ferramentas críveis e podem auxiliar na simulação de cenários e tomada de decisão.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, K.C. Calibration of Hydrologic Models: When is a Model Calibrated? Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. p. 2449-2455, 2012.
- ABBASPOUR, K.C. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs A User Manual. 2015. 100 p.
- ABBASPOUR, K.C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. Journal of Hydrology, v. 524, p. 733– 752, 2015.
- ANDRÉASSIAN, V. "Waters and forests: from historical controversy to scientific debate". Journal of Hydrology. v. 291, p. 1–27, 2004.
- ARIAS, V.; BENITEZ, S.; GOLDMAN, R. 2010. Water fund for catchment management. Quito: TEEBcase. 2010.
- BAGSTAD, K. J.; SEMMENS, D.J.; WAAGE, S.; WINTHROP, R. "A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation", Ecosystem Services, v. 5, p. 27– 39, 2013.
- BONNESOEUR, V.; LOCATELLI, B.; GUARIGUATA, M.R.; OCHOA-TOCACHI, B.F. "Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: A systematic review". Forest Ecology and Management v.433, p. 569–584, 2019.
- BRAUMAN, K.A.; DAILY, G.C.; DUARTE, T.K.; MOONEY, H.A. "The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services". Annual Review Environmental Resources. v. 32, p. 67–98, 2007.
- BRESSIANI, D. de A.; GASSMAN, P.W.; FERNANDES, J.G.; GARBOSSA, L.H.P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N.B.; MENDIONDO, E.M. "A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects". International Journal of Agricultural and Biological Engineering. v.8, n.3, p.9-35, 2015.
- BUYTAERT, W.; IÑIGUEZ, V.; DE BIEVRE, B. "The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean paramo". Forest Ecology and Management. v. 251, n. 1–2, p. 22-30, 2007.
- BUYTAERT, W.; WYSEURE, G.; DE BIEVRE, B.; DECKERS, J. "The effect of landuse changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador". Hydrol. Process. v.19, p. 3985–3997, 2005.
- BUYTAERT, W.; DE BIEVRE, B.; WYSEURE, G.; DECKERS, J. "The use of linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the

hydrology of catchments in the Andes". Hydrology and Earth System Science, v.8, n.1, p. 108-114, 2004.

- BUYTAERT, W.; DECKERS, J; WYSEURE, G. "Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo)", Geomorphology v.73, n.3-4, p.207-221, 2005.
- CAMACHO, D. C. Esquemas de pagos por servicios ambientales para la conservación de cuencas hidrográficas en el Ecuador. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, v. 17, n. 1, p. 54-66, 2008.
- CHIN, D. A. Water resources engineering. Prentice Hall, 2000. 750 p.
- CHOW, V.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied Hydrology. McGraw-Hill, Inc., 1988, 572 p.
- CLARKE, R. T. "A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use". Journal of Hydrology, v. 19, p. 1-20, 1973.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. Proto Alegre: CD.G Casa de Soluções e Editora. 2013.
- CRESPO, P.; CÉLLERI, R.; BUYTAERT, W. "Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems". Status and perspectives of hydrology in small basins, 2010, 336 p.
- CRESPO, P.; CISNEROS, F.; TORRES, P., CÉLLERI, R.; FEYEN, J. "Efecto de la escala de la informacion sobre el desempeño del modelo SWAT em uma microcuenca de Montaña". X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, 2006.
- CRESPO, P.; FEYEN, J.; BUYTAERT, W. "Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador)", Journal of Hydrology, v. 407, p. 164–174, 2011
- CRESPO, P.; FEYEN, J.; BUYTAERT, W. "Development of a conceptual model of the hydrologic response of tropical Andean micro-catchments in Southern Ecuador", Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., v. 9, p. 2475–2510, 2012.
- DIAS, F. L. F. Efeito da aplicação de calcário, lodo de esgoto e vinhaça em solo cultivado em sorgo granífero (Sorghum bicolor L. Moench). 1994. 74 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Engenharia Agronômica) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 1994.
- DIAS, V. S. Simulação de vazão aplicada ao reservatório da UHE Furnas utilizando modelo SWAT. 72 p. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2017.

DINGMAN, S.L. Physical hidrology. Prentice Hall, Upper Saddle River. 2002.

- ESPINOSA, J.; RIVERA, D. "Variations in water resources availability at the Ecuadorian páramo due to land-use changes". Environ Earth Sci, v.11, p. 73:75, 2016.
- FARLEY, K.A.; JOBBAGY, E.G.; JACKSON, R.B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. Global Change Biology, v. 11, p. 1565-1576, 2005.
- FERNANDES, A. M. Características hidrogeoquímicas da bacia de drenagem do rio Sorocaba, São Paulo: processos erosivos mecânicos e químicos. 241 p. Dissertação de doutorado apresentada à Universidade São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Ciências. Área de concentração: Química na Agricultura e no Ambiente, 2012.
- FINK, M.; KRAUSE, P.; KRALISCH, S. Development and application of the modelling system J2000-S for the EU-water framework directive. Adv. Geosci. v. 11, p. 123–130, 2007.
- FISHER, B.; TURNER, R. K.; MORLING, P. "Defining and classifying ecosystem services for decision making". Ecological Economics, v. 3, n. 68, p. 643-653, 2009.
- FOLEY, J. A. et al. "Global consequences of land use". Science, New York, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005.
- FUJIEDA, M.; KUDOH, T.; CICCO, V.; CARVALHO, J. L. Hydrological processes at two subtropical forest catchments: the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. Journal of Hydrology. v. 196, p. 26 – 46, 1997.
- GARCÍA, C.R. Soil properties and land use affecting soil water dynamics in Andisols and Inceptisols at two mid-elevation sites in the Colombian Andes. 159 p. Tese de doutorado apresentada à British Columbia University, Vancouver – Canadá, Ciências do Solo, 2018.
- GASSMAN, P. W. REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. Working Paper 07-WP 443. Center for Agricultural and Rural Development Iowa State University. 2007.
- GHIMIRE, C. P.; BRUIJNZEEL, L. A.; LUBCZYNSKI, M. W.; BONELL, M. Negative trade-off between changes in vegetation water use and infiltration recovery after reforesting degraded pasture land in the Nepalese Lesser Himalaya. Hydrol. Earth Syst. Sci., v. 18, n. 12, p. 4933–4949, 2014.
- GÓMEZ, J.V. "Estimated calibrated parameters in SWAT model for Andean watersheds". Decision and Policy Analysis. CIAT. 2013.

- de GROOT, R.S.; ALKEMADE, R., BRAAT, L., HEIN, L., & WILLEMEN, L.
  "Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making". Ecological Complexity. v. 7, n. 3, p. 260–272, 2010.
- HAMEL, P.; GUSWA, A. J. "Uncertainty analysis of a spatially explicit annual waterbalance model: case study of the Cape Fear basin, North Carolina". Hydrology and Earth System Sciences, v. 19, p.839–853, 2015.
- HONDA, E. A.; DURIGAN, G. A restauração de ecossistemas e a produção de água. Hoehnea, v. 44, n 3, p. 315-327, 2017.
- JACOBI, P. R.; GRANDISOLI, E. Água e Sustentabilidade: desafios, perspectivas e soluções. São Paulo: Reconectta. 2017. 110 p.
- JACKSON, R. B.; JOBBÁGY, E.G.; AVISSAR, R. "Trading water for carbon with biological carbon sequestration". Science, v. 310, p. 1944–1947, 2005.
- JAMS Java Open-Source software. Apresenta software de modelo hidrológico. Disponível em: <a href="http://jams.uni-jena.de/">http://jams.uni-jena.de/</a>>. Acesso em 11 set. 2017.
- KRAUSE, P.; BÄSE, F.; BENDE-MICHL, U.; FINK, M.; FLÜGEL, W.; PFENNIG, B. Multiscale investigations in a mesoscale catchment – hydrological modelling in the Gera catchment. Adv. Geosci., v. 9, p. 53–61, 2006.
- KRISHNASWAMY, J.; BONNELL, M., BASAPPA, V. The groundwater recharge response and hydrologic services of tropical humid forest ecosystems to use and reforestation: Support for the "Infiltration-evapotranspiration trade-off Hypothesis". Journal of Hydrology. v. 498, p. 191-209, 2013.
- KUMAR, S. Studying the effect of spatial scaling on hydrologic model calibration using soil and water assessment tool (SWAT). 2008. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Purdue University, West Lafayette, 2008.
- LAWLER, J.J.; Lewis, D.J.; Nelson, E. "Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States". PNAS. v. 111, n. 20, p. 7492–7497, 2014.
- LEE, H. MACDONALD; STEDNICK, JOHN D. "Forest and Water: a state-of-the-art review for Colorado". Completion Report No. 196. Colorado Water Resources Research Institute. 2003.
- LEGATES, D. R.; MACCBE, G. J. Evaluating the use of "goodness of fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research, Ann Abor, v. 26, p. 69-86, 1999.
- LIU, M.; TIAN, H.; CHEN, G. "Effects of Land-Use and Land-Cover Change on Evapotranspiration and Water Yield in China During 1900-2000". Journal of the American Water Resources Association, Middleburg, v. 5, n. 44, p. 1193–1207, 2008.

- LUCAS, M. C., GUANABARA, R. C., WENDLAND, E. 2012: Estimativa de recarga subterrânea em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. Boletín Geológico y Min. v. 123, p. 311–323, 2012.
- MACHADO, A. R. Alternativas de restauração de florestas ripárias para o fornecimento de serviços ecossistêmicos. 148 p. Tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Ciências. Área de Concentração: Engenharia Hidráulica e Ambiental, 2017
- MANNA, L.LA., GUILLERMO BUDUBA, C., ROSTAGNO, C.M. Soil erodibility and quality of volcanic soils as affected by pine plantations in degraded rangelands of NW Patagonia. Eur. J. For. Res., v. 135, p. 643–655, 2016.
- MARTIN-ORTEGA, J.; OJEA, E.; ROUX, C. "Payments for water ecosystem services in Latin America: a literature review and conceptual model". Ecosystem Services, v.6, p. 122–132, 2013.
- MELO, A.C.G.; DURIGAN, G. "Evolução estrutural de reflorestamentos de restauração de matas ciliares no Médio Vale do Paranapanema". Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 73, p. 101-111, 2007.
- MELO NETO, J. O. Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT. 147 p. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Sistemas Agrícolas, 2013.
- VÁSCONEZ, P. M.; CASTILLO, A.; FLORES, S; HOFSTEDE, R.; JOSSE, C.; LASSO, S.; MEDINA, G.; OCHOA, N.; ORTIZ, D. Páramo. Paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado. EcoCiencia/Abya Yala/ECOBONA. Quito. 2011. 386 p.
- MONTANARI, A.; YOUNG, G.; SAVENIJE, H.H.G.; HUGHES, D. "Panta Rhei Everything Flows: change in hydrology and society – The IAHS Scientific Decade 2013–2022", Hydrology Science Journal, v. 58, p. 1256–1275, 2013.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: a discussion of principles. Journal of Hydrology, London, v. 10, p. 282-290, 1970. Part I.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and water assessment tool: theorical documentation version 2009. Temple: Blackland Research Center, Texas AgriLife Research. 618 p. 2011.

OCHOA-TOCACHI, B. F.; BUYTAERT, W.; ANTIPORTA, J. "High-resolution hydrometeorological data from a network of headwater catchments in the tropical Andes", Scientific Data, n.180080, 2018.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M.A.; SCOTT, R.L. The water balance components of undisturbed tropical woodlands in the Brazilian cerrado. Hydrology and Earth System Sciences, v. 19, p. 2899-2910, 2015.

- OMANI, N.; SRINIVASAN, R.; KARTHIKEYAN, R. "Hydrological Modeling of Highly Glacierized Basins (Andes, Alps, and Central Asia)", Water,v.9, n.111, 2017.
- PAGIOLA, S.; ARCENAS, A.; PLATAIS, G. Can payments for environmental services help reduce poverty? An exploration of the issues and the evidence to date from Latin America. Word Development, Washington, v. 33, n. 2, p. 237–253, 2005.
- PAGIOLA, S.; BISHOP, J.; LANDELL-MILLS, N. Selling Forest Environmental Services: Market-Based Mechanisms for Conservation and Development. London/New York. 2002. 299 p.
- PINTON, L., CUNHA, C. "O uso de geoindicadores em paisagem rural: subsídios a análise das mudanças morfológicas antropogênicas da bacia do Córrego do Cavalheiro – Analândia (SP). Revista do Departamento de Geografia – USP, São Paulo, v. 29, p. 01 – 19, 2015.
- PODWOJEWSKI, P.; POULENARD, J. Páramo Soils. Encyclopedia of Soil Science. New York. 2004.
- PONETTE-GONZALEZ, A.G.; BRAUMAN, K.; MARIN-SPIOTTA, E.; FARLEY, K.A. "Managing water services in tropical regions: From land cover proxies to hydrologic fluxes". Ambio. v. 44, n. 5, p. 367–375, 2014.
- QUEIROZ, M. R. A variabilidade climática e as mudanças de uso da terra: um estudo de caso da vazão e sedimentos da bacia do rio Piracicaba com modelagem numérica. 110 p. Dissertação de doutorado apresentada à Universidade São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Ciências. Área de concentração: Ecologia Aplicada, 2014.
- QUINTERO, M.; WUNDER, S.; ESTRADA, R.D. "For services rendered? Modeling hydrology and livelihoods in Andean payments for environmental services schemes." Forest Ecol. Manage. v. 258, n. 9, p. 1871-1880, 2009.
- QUICHIMBO, P., TENORIO, G., BORJA, P., CÁRDENAS, I., CRESPO, P., CÉLLERI, R. Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. Suelos Ecuatoriales, v. 42, p. 138–153, 2012.
- RAHBEH, M.; CHANASYK, D., MILLER, J. "Two-Way CalibrationValidation of SWAT Model for a Small Prairie Watershed with Short Observed Record", Canadian Water Resources Journal v.36:3, p. 247-270, 2011
- RENNÓ, C. D. Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas. 148 p. Dissertação de doutorado apresentada ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, 2003.

- RENNÓ, C.D.; SOARES, J.V. Modelos hidrológicos para gestão ambiental: Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas - relatório técnico parcial. São José dos Campos: INPE, 2000. 60 p.
- RIBEIRO, A. S. Modelagem chuva-vazão utilizando framework JAMS em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. 141 p. Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos. Ciências. Programa de Engenharia Hidráulica e Saneamento, 2012
- RICHTER, B.D.; BAUMGARTNER, J.V.; WIGINGTON, R.; BRAUN, D.P. "How much water does a river need?" Freshwater Biology, v.37, p.231-249, 1997.
- dos SANTOS, J. Y. G. Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na bacia do rio Tapacurá (Pernambuco, Brasil). 205 p. Dissertação de doutorado apresentada à Universidade Federal de Pernanbuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, 2015.
- SCHROTER, M.; REMME, R.P. Spatial prioritisation for conserving ecosystem services: comparing hotspots with heuristic optimisation. Landscape Ecololy. v. 31, p. 431–450, 2016.
- SILVA, J. M. O serviço ambiental hidrológico das áreas de proteção permanente: um estudo de caso com modelagem numérica em pequena e mesoescala na bacia do Rio Piracicaba. 100 p. Dissertação de doutorado apresentada à Universidade São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia -Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas Departamento de Ciências Atmosféricas, 2013.
- SILVA JÚNIOR, O. B. et al. Efeito do uso do solo nos eventos de cheia em micro e meso escalas: bacia do Potiribu. Rev. Bras. Recur. Hídricos, v. 9, p. 153–167, 2004.
- SIVAPALAN, M.; KONAR, M.; SRINIVASAN, V. "Socio-hydrology: use-inspired water sustainability science for the Anthropocene," Earth's Future, v. 2, p. 225– 230, 2014.
- SMAKHTIN, V. Low flow hydrology: a review. J. Hydrol., v. 240, p. 147–186, 2001.
- SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT). Theoretical Documentation Version 2009. Texas University. College of Agriculture and Life Science. September 2011.
- STEHR, M.; AGUAYO, O.; PARRA, O.; ROMERO, F.; ALCAYAGA, H. "Modelling the hydrologic response of a mesoscale Andean watershed to changes in land use patterns for environmental planning", Hydrol. Earth Syst. Sci., v. 14, p. 1963– 1977, 2010.

- TERRADO, M.; ACUÑA, V.; ENNAANAY, D. "Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean basin". Ecological Indicators, v. 37, p. 199–209, 2014.
- TRZESNIAK, P. Indicadores quantitativos: reflexões que antecedem seu estabelecimento. Ci. Inf., v. 27, n.2, p. 159-164, 1998.
- The Nature Conservancy (TNC), 2009. Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 User's Manual.
- TUCCI, C. E. M. Hidrologia, ciências e aplicação. 4. ed. Porto Alegre:UFRGS/ABRH, 2007. 943 p.
- TUCCI, C.E.M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre: Ed. da UFRGS; ABRH, 2005. 669 p.
- TUCCI, C. E. M., CLARKE, R. T. Impacto das Mudanças da Cobertura Vegetal no Escoamento: Revisão. Rev. Bras. Recur. Hídricos. v. 2, p. 135–152, 1997.
- TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. Revista Ciência e Cultura, Campinas, v. 55, n. 4, p. 31-33, 2003.
- TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. Impactos potenciais das alterações do código florestal nos recursos hídricos. Biota Neotropica, Campinas, v. 10, n. 4, p. 67-76, 2010.
- VIEIRA, S.A.; ALVES, L.F.; AIDAR, M.; ARAÚJO, L.S. "Estimation of biomass and carbon stocks: the case of the Atlantic Forest". Biota Neotropica, São Paulo, v.8, n.2, 2008.

## 8. ANEXO A

Parâmetro	Descrição	Valor
SFTMP	Temperatura média do ar onde ocorre chuva no formato de neve	1,38
SMTMP	Temperatura limite para derretimento de neve	5
CN2 – G1 CN2 – G2 CN2 – G3 CN2 – G4 CN2 – G5 CN2 – G6	Curva-número inicial para a condição de umidade II (para os grupos de sub-bacias de 1 a 6)	- -15% -25% -30% 23% -10%
PLAPS	Taxa de variação de chuva	0,64
TLAPS	Taxa de variação de temperatura	2,69
ESCO	Coeficiente de compensação de evaporação de água no solo	0,55
SOL_AWC	Capacidade de armazenamento de água no solo	0,38
RCHRG_DP	Coeficiente de percolação do aquífero	0,002
REVAPMN	Limite no aquífero raso para revap	536
GW_REVAP	Coeficiente de revap	0,075
GWQMN	Limite no aquífero raso para escoamento de base	854
GW_DELAY	Intervalo de tempo para recarga do aquífero	216

Tabela 11 – Resultado da calibração dos parâmetros.

Sendo: SFTMP, SMTMP, TIMP, CN2, PLAPS, TLAPS, ESCO, SOL\_AWC, RCHRG\_DP, REVAPMN, GW\_REVAP, GWQMN E GW\_DELAY.