

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE
RECURSOS HÍDRICOS – PROFÁGUA

ELIANE MEIRE DE SOUZA ARAÚJO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
INFLUÊNCIA DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS SOBRE A CONDIÇÃO
HIDROLÓGICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

VITÓRIA
2019

**TRABALHO DISSERTATIVO:
INFLUÊNCIA DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS SOBRE A CONDIÇÃO
HIDROLÓGICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**

ELIANE MEIRE DE SOUZA ARAÚJO

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Orientador: Diogo Costa Buarque

Coorientador: Edmilson Costa Teixeira.

VITÓRIA
2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

A658i Araújo, Eliane Meire de Souza, 1991-
INFLUÊNCIA DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS
SOBRE A CONDIÇÃO HIDROLÓGICA DE BACIAS
HIDROGRÁFICAS / Eliane Meire de Souza Araújo. - 2019.
94 f. : il.

Orientador: Diogo Costa Buarque.

Coorientador: Edmilson Costa Teixeira.

Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos em Rede) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

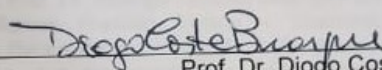
1. Ciências Ambientais. 2. Serviços ambientais. 3. Balanço hidrológico. 4. Modelagem. 5. Hidrologia florestal. 6. Gestão Ambiental. I. Buarque, Diogo Costa. II. Teixeira, Edmilson Costa. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 628

“INFLUÊNCIA DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS SOBRE A CONDIÇÃO HIDROLÓGICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS”

Eliane Meire de Souza Araújo

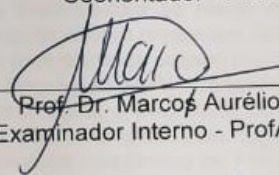
Banca Examinadora:



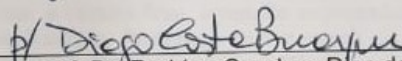
Prof. Dr. Diogo Costa Buarque
Orientador - ProfÁgua/CT/UFES



Prof. Dr. Edmilson Costa Teixeira
Coorientador - ProfÁgua/CT/UFES



Prof. Dr. Marcos Aurélio Costa Caiado
Examinador Interno - ProfÁgua/CT/UFES



Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva
Examinador Externo - IPH/UFRGS



Prof. Dr. Marcos Franklin Sossai
Examinador Externo - SEAMA/ES/GOV

Edmilson Costa Teixeira
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos
Hídricos
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Vitória/ES, 22 de julho de 2019.

EPIGRAFE

*“O movimento vaivém nas águas-lembranças
dos meus marejados olhos transborda-me a vida,
salgando-me o rosto e o gosto.*

*Sou eternamente naufraga,
mas os fundos oceanos não me amedrontam
e nem me imobilizam.*

*Uma paixão profunda é a boia que me emerge.
Sei que o mistério subsiste além das águas.”*

Recordar é preciso, de Conceição Evaristo.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente gostaria de agradecer aos professores Diogo Costa Buarque e Edmilson Costa Teixeira pela orientação firme e segura, pelos ensinamentos e pela disponibilidade dispendida durante todo o processo do mestrado. Sinto-me honrada.

Agradeço ao LabGest, na figura do Edmilson e demais amigos de trabalho pelo suporte, incentivo e paciência e inspiração. Agradeço ao companheirismo, as alegrias, aos momentos de distração, o carinho, aos laços de amizade construídos e fortalecidos, que fizeram os meus dias mais doces e a carga mais leve. Bruno, Andressa, Karla, Alessandra, Anna Paula, Valéria, Felipe, Aaron, Núbia, Bárbara, Ranielle, Fábio, Angélica, Paulo, aos presentes que o RRDM me deu, Aline, Izabella, Daniel, João, Tamires, Carol e Carol, obrigada pela amizade, pelas palavras de incentivo pelas horas dedicadas a ouvir, a tentar ajudar na solução de um problema e outro. Vocês são incríveis!

A minha dupla, José de Aquino. Sou muito grata pela amizade, pelo companheirismo, por todo o apoio durante essa caminhada do mestrado. Obrigada por ter me apresentado os Sistemas Agroflorestais e aberto caminho para essa linha de pesquisa, que me cativou e desafiou a todo momento. Agradeço também a novas amizades e redes de apoio unidas pelo SWAT: Luana, Selena, Thais e Livia, aprendi muito com vocês e sou grata por toda atenção, paciência e compartilhamentos.

Não poderia deixar de agradecer a minha família, por todo amor, por toda fé depositada em mim desde sempre. Agradeço, pela compreensão nos incontáveis momentos de ausência, em que abdiquei de estarmos juntos, para seguir meus sonhos, cumprir minhas obrigações, escrever a minha história. Agradeço especialmente a minha irmã, Dr. Keila, minha inspiração acadêmica desde sempre. Obrigada por me mostrar o quão longe podemos chegar que somos senhoras do nosso destino, que tenho dentro de mim tudo o que preciso e que tenho em vocês, minha família, meu porto seguro.

Agradeço aos amigos mais próximos Thiara, Vitor, Bárbara e Maiara, sou muito grata pela amizade, pelo amor e por todo incentivo. Agradeço à Sônia, pela paciência sem fim, pela compreensão sem preço e pelo incentivo assertivo, por todo apoio psicológico e emocional. Você foi única e fundamental nesse processo.

Agradeço também ao grupo de Mulheres Negras da Pós-Graduação UFES, Virgínia Leone Bicudo. Encontrei em vocês apoio identificação, afetos e potência pura na ciência. Obrigada por ser quem são, por seguirem abrindo portas, desbancando preconceitos dentro e fora da universidade. Vocês são incríveis, sou imensamente grata por fazer parte desse grupo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estratificação de um SAF.	21
Figura 2: Evolução no tempo de SAF sucessional com manejo intensivo: a) SAF Simples; b) SAF Complexo.	22
Figura 3: Disposição de SAF em Fileiras.	22
Figura 4: Disposição de SAF no formato de Quintal florestal.	23
Figura 5: Sistema agroflorestal sequencial em três estágios.	23
Figura 6: Influência dos SAFs na manutenção dos recursos hídricos.	28
Figura 7: Fluxograma geral metodológico.	50
Figura 8: Área de Estudo.	51
Figura 9: Modelo Digital de Elevação, resolução espacial 30 metros.	52
Figura 10: Pedologia, escala 1:400.000.	53
Figura 11: Uso e Ocupação do Solo.	54
Figura 12: Cenários de simulação com conversão em SAF das áreas: (A) de cultivo agrícola de Café; (B) de todos os cultivos agrícolas; (C) de Pastagem; (D, E, F e G) de Pastagem e cultivos Agrícolas, no entanto alterando das espécies produtivas (D, E e F) e nativas (G).	61
Figura 13: Distribuição do <i>GWQ/WYLD</i> na RHCG para os cenários de aumento da cobertura de SAFs.	73
Figura 14: Distribuição do <i>LATQ</i> na RHCG para os cenários de aumento da cobertura de SAFs.	74
Figura 15: Distribuição do <i>SURQ</i> na RHCG para os cenários de aumento da cobertura de SAFs.	76
Figura 16: Distribuição da <i>WYLD/PREC</i> na RHCG para os cenários de aumento da cobertura de SAFs.	77
Figura 17: Distribuição do <i>PERC/PREC</i> na RHCG para os cenários de aumento da cobertura de SAFs.	78

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Hidrograma dos processos de calibração (1991-2005) e validação (2006-2012) do modelo.	64
Gráfico 2: Potenciais Indicadores da Condição Hidrológica.	66
Gráfico 3: Hidrograma da região do Córrego do Galo.	67
Gráfico 4: Potenciais Indicadores da Condição Hidrológica – Componente Estratos.	68
Gráfico 5: Indicadores da condição hidrológica da RHCG – Comparação entre os cenários de aumento da cobertura de SAFs.	69
Gráfico 6: Hidrograma dos cenários de aumento da cobertura de SAFs no período de 2000 a 2005. Comparativo entre o cenário atual de uso e ocupação do solo e os cenários de simulação de aumento da cobertura de SAFs em 9% (Cen. A), 16% (Cen. B), 26% (Cen.	

C) e 42% (Cen. D). O período de 2000 a 2005 foi considerado neste gráfico apenas para que as alterações sejam visualmente mais perceptíveis, mas o período total de simulação foi de 1996 a 2012.	71
Gráfico 7: Curva de permanência das vazões médias mensais da RHCG, para o período total de simulação de 1996 a 2012. Comparativo entre o cenário atual de uso e ocupação do solo e os cenários de simulação de aumento da cobertura de SAFs em 9% (Cen. A), 16% (Cen. B), 26% (Cen. C) e 42% (Cen. D).	71
Gráfico 8: Indicadores da condição hidrológica da RHCG – Comparação entre os cenários de diferentes arranjos de SAFs.	79
Gráfico 9: Hidrograma dos cenários de diferentes arranjos de SAFs no período de 2000 a 2005. O período de 2000 a 2005 foi considerado neste gráfico apenas para que as alterações sejam visualmente mais perceptíveis, mas o período total de simulação foi de 1996 a 2012.	81
Gráfico 10: Curva de permanência das vazões médias mensais da RHCG, para o período total de simulação de 1996 a 2012. Comparativo entre o cenário atual de uso e ocupação do solo e os cenários de simulação de aumento da cobertura de SAFs em 42% para diferentes composições de arranjos agroflorestais.	82

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1: Caracterização de diferentes opções de SAFs.	25
Quadro 2: Parâmetros do output global da bacia.	35
Quadro 3: Parâmetros de output por sub-bacias.	35
Quadro 4: Parâmetros de entrada do SWAT utilizados na calibração da RHCG.	56
Quadro 5: Variáveis obtidas com o SWAT por sub-bacias.	58
Quadro 6: Descrição dos cenários de SAFs. EB: Estrato Baixo; EM: Estrato Médio; EA: Estrato Alto.	60
Tabela 1: Caracterização das estações climatológicas utilizadas.	52
Tabela 2: parâmetros da vegetação modificados no banco de dados do SWAT.	54
Tabela 3: Classificação das estatísticas de avaliação de desempenho do modelo.	57
Tabela 4: Parâmetros do SWAT e valores obtidos na fase de calibração. As extensões dos parâmetros se referem a: águas subterrâneas (.gw); unidade de resposta hidrológica (.hru); gerenciamento/uso e ocupação (.mgt); solos.sol).	62
Tabela 5: Estatísticas de avaliação para as etapas de calibração e validação, na estação fluviométrica 57170000 - Córrego do Galo, disponibilizado pela Agência Nacional das Águas - ANA.	63
Tabela 6: Comparação dos valores das variáveis do modelo em função da alteração do uso e ocupação do solo.	64
Tabela 7: Comparação dos valores em função da alteração do uso e ocupação do solo.	67

SUMÁRIO

RESUMO	11
CONSIDERAÇÕES PARA O SISTEMA NACIONAL DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS (SINGREH) – SÍNTESE.....	13
1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	17
3.1 O PAPEL DA COBERTURA FLORESTAL SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS	17
3.1.1 Precipitação	17
3.1.2 Interceptação.....	17
3.1.3 Evapotranspiração	18
3.1.4 Escoamento superficial.....	18
3.1.5 Infiltração.....	18
3.1.6 Fluxo de base.....	19
3.1.7 Vazão	19
3.1.8 Solos	19
3.1.9 Manejo Florestal.....	20
3.2 SISTEMAS AGROFLORESTAIS	20
3.2.1 Programa Reflorestar	28
3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA DE ALTERAÇÃO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	30
3.4 MODELO SWAT	33
3.4.1 Aplicação do modelo SWAT na simulação de cenários de SAFs.....	38
3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
4 ARTIGO.....	46
4.1 INTRODUÇÃO	47
4.2 METODOLOGIA	49
4.2.1 Caracterização da Área de Estudo	50
4.2.2 Dados Utilizados	51
4.2.3 Modelagem Computacional.....	54

4.2.4	Calibração e Validação do Modelo	55
4.2.5	Influência da forma de representação da condição hidrológica	57
4.2.6	Avaliação da influência de sistemas agroflorestais sobre a disponibilidade hídrica	59
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.3.1	Calibração e validação do modelo.....	61
4.3.2	Influência da forma de representação da condição hidrológica	64
4.3.3	Avaliação de sistemas agroflorestais sobre a disponibilidade hídrica.....	69
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
4.5	CONCLUSÃO	84
5	RECOMENDAÇÕES	85
6	CONSIDERAÇÕES PARA O SINGREH.....	86
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

RESUMO

Os sistemas agroflorestais (SAFs) fornecem uma série de serviços ecossistêmicos hidrológicos associados à cobertura florestal natural. Por esse motivo, a adoção de sistemas agroflorestais é incentivada em diferentes países, sendo aplicados, por exemplo, em projetos e programas de incentivo à restauração das paisagens e desenvolvimento sustentável, como é o caso do Programa Reflorestar, no Espírito Santo. Entretanto, observa-se, por um lado, uma carência de estudos que investigam e quantificam impactos de sistemas agroflorestais sobre os componentes do ciclo hidrológico das bacias hidrográficas e, por outro, a necessidade de difusão do conhecimento e percepção dos benefícios associados a estes sistemas, para que a restauração das paisagens florestais seja difundida no território. Neste contexto, o presente trabalho busca avaliar a influência de SAFs sobre a condição hidrológica de bacias hidrográficas, por meio de indicadores obtidos a partir de variáveis do modelo SWAT, com vistas a ampliar o conhecimento acerca da adoção desses sistemas sobre a disponibilidade hídrica. Foram simulados cenários de: a) aumento da cobertura florestal por SAFs; e b) diferentes arranjos dos sistemas, com base nas tipologias vegetais existentes na área de estudo. Foram definidos como indicadores da condição hidrológica: a fração da precipitação que contribui para a vazão ($WYLD/PREC$); contribuição da água subterrânea para vazão ($GW_Q/WYLD$); contribuição do fluxo lateral para vazão ($LAT_Q/WYLD$); contribuição do escoamento superficial para vazão ($SUR_Q/WYLD$); e a fração da água da chuva que percola para alimentação dos aquíferos rasos e profundos ($PERC/PREC$). O estudo mostrou maior influência dos SAFs sobre a dinâmica subterrânea, com aumento da recarga de aquíferos rasos e profundos, bem como aumento da contribuição do fluxo de base para as vazões, para cenários de adoção de até 42% de SAFs. A contribuição do escoamento superficial para as vazões reduziu em até 22% com o aumento da área de adoção de SAFs. As variações foram menos significativas quanto aos diferentes arranjos de SAFs, contudo, os resultados apontaram que cenários com predominância de estratos médios e altos provocaram maior alteração para os indicadores avaliados. Portanto, o aumento da cobertura de SAFs produziu influência na condição hidrológica, sobretudo na dinâmica das águas subterrâneas e escoamento superficial. A contribuição para as vazões foi mantida no horizonte de tempo avaliado. Além disso, o modelo SWAT se mostrou uma ferramenta capaz de auxiliar na avaliação dos efeitos da adoção de SAFs com vistas à provisão de serviços ecossistêmicos, contribuindo para maior conhecimento acerca dos benefícios hidrológicos associados a estes sistemas, com potenciais subsídios às políticas de incentivo de aumento da cobertura florestal.

ABSTRACT

Agroforestry systems (SAFs) provide a range of hydrological ecosystem services associated with natural forest cover. For these reasons, the adoption of agroforestry systems is encouraged in different countries and is applied, for example, in projects and programs to promote the restoration of landscapes and sustainable development, such as Reflorestar, the reforestation program in Espírito Santo. However, on one hand, there is a lack of studies that investigate and quantify the impacts of agroforestry systems on the components of the hydrological cycle of the river basins and, on the other, the need to disseminate knowledge and perceive the benefits associated with these systems so that the restoration of forest landscapes can be spread throughout the territory. In this context, the present work seeks to evaluate the influence of SAFs on the hydrological condition of hydrographic basins, through indicators obtained from variables of the SWAT model, aiming to increase the knowledge about the adoption of these systems on water availability. The scenarios simulated were: a) increase in forest cover by SAFs; and b) different arrangements of the systems, based on the plant typologies in the study area. As the defined indicators of the hydrological condition were: the fraction of the precipitation that contributes to the river flow ($WYLD/PREC$); contribution of groundwater to river flow ($GW_Q/WYLD$); contribution of lateral flow to river flow ($LAT_Q/WYLD$); contribution of the surface runoff to the river flow ($SUR_Q/WYLD$) and the fraction of rainwater percolated to feed shallow and deep aquifers ($PERC/PREC$). The study showed a greater influence of the SAFs on the underground dynamics, with increased recharge of shallow and deep aquifers, as well as increased contribution of the base flow to the river flows, for scenarios of adoption of up to 42% of SAFs. The contribution of surface runoff to flow rates reduced by up to 22% with the increase in the area of adoption of SAFs. The variations were less significant regarding the different arrangements of SAFs, however, the results indicated that scenarios with predominance of medium and high strata caused a greater change for the indicators evaluated. Therefore, the increased SAFs' coverage had an influence on the hydrological condition, especially on groundwater dynamics and surface runoff. The contribution to the flows was maintained over the timeframe. In addition, the SWAT model proved to be a tool capable of assisting in the evaluation of the effects of adopting SAFs for the provision of ecosystem services, contributing to greater knowledge about the hydrological benefits associated with these systems, with potential subsidies to the policies to increase the forest cover.

CONSIDERAÇÕES PARA O SISTEMA NACIONAL DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS (SINGREH) – SÍNTESE

O presente estudo se insere no contexto da integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental, que faz parte das diretrizes gerais de ação da Política Nacional de Recursos Hídricos. Institucionalmente, no Espírito Santo, o Programa Reflorestar/ES atua na perspectiva de contribuir para a restauração do ciclo hidrológico de bacias hidrográficas, por meio do Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) pela conservação da mata nativa e em recuperação, reflorestamento e arranjos florestais que conciliam a prestação de serviços ecossistêmicos com a geração de renda para o produtor rural – sistemas agroflorestais (SAFs). A adoção de SAFs possui potencial de interferência sobre a condição hidrológica das bacias hidrográficas. No entanto, foi apontada a necessidade de estudos que estimem a influência desses sistemas sobre esse aspecto. Portanto, compreender como e o quanto as práticas agroflorestais afetarão esses processos é também importante para uma gestão dos recursos hídricos e de paisagens mais adequadas. Os resultados apontaram que a adoção de SAFs contribui para a melhoria da condição hidrológica de uma região hidrográfica. Inseridos no contexto do Programa Reflorestar/ES, o conhecimento acerca da melhoria das condições hidrológicas promovidas por esses sistemas pode contribuir para o fortalecimento de suas ações, no sentido de ampliação da adoção dos SAFs.

CONSIDERATIONS FOR NATIONAL WATER RESOURCE MANAGEMENT SYSTEM (SINGREH) – SYNTHESIS

This study is part of the integration of water resources management with environmental management, which is part of the general guidelines for action of the National Water Resources Policy. Institutionally, in the State of Espírito Santo, the Program Reforestation / ES, works with the perspective of contributing to the restoration of the hydrological cycle of watersheds through the Payment for Environmental Services (PSA) for the conservation of the native forest and in recovery, reforestation and forest combine the provision of ecosystem services with the generation of income for rural producers - agroforestry systems (SAFs). The adoption of SAFs has the potential of interfering with the hydrological condition of the river basins. However, it was pointed out the need for studies that estimate the influence of these systems on this aspect. Therefore, understanding how and how agroforestry practices will affect these processes is also important for water resource management and more suitable landscapes. The results indicated that the adoption of SAFs contributes to the improvement of the hydrological condition of a hydrographic region. Inserted in the context of the Reforestation / ES Program, knowledge about the improvement of the hydrological conditions promoted by these systems can contribute to the strengthening of their actions, in order to increase the adoption of SAFs.

1 INTRODUÇÃO

As alterações da cobertura florestal associada à ausência ou ao manejo inadequado dos sistemas florestais podem causar impactos (positivos e/ou negativos) em vários componentes do ciclo hidrológico natural, tais como evapotranspiração, infiltração da água no solo e escoamento superficial (BAYER, 2014; BENINI, 2015; LOPES, 2008; ÖZTÜRK; COPTY; SAYSEL, 2013; SAJKUMAR; REMYA, 2015). Historicamente, os processos de alteração do uso e ocupação do solo tendem a reduzir a cobertura florestal, dando espaço às manchas urbanas, extensas áreas de pastagens, entre outros usos menos sustentáveis do solo, que causam impactos sobre a quantidade e qualidade dos recursos hídricos. Outro fator que implica na redução da cobertura florestal é o potencial de fertilidade dos solos sob as florestas, que faz com que estas sejam alvo de conversão em terras agrícolas em diversas regiões no mundo (MWANGI et al., 2016).

Assim, a restauração florestal tem sido objeto de diferentes projetos e políticas no Brasil (FERNANDES; RAUEN, 2016; MORAES, 2016) e no mundo (GIRI; ARBAB; LATHROP, 2018; HERNÁNDEZ-MORCILLO et al., 2018). Na última década, no estado do Espírito Santo, foram elaborados diversos projetos com foco na restauração das paisagens florestais. Atualmente, o Programa Reflorestar/ES, coordenado pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo (SEAMA), atua nesta perspectiva e busca contribuir para a restauração do ciclo hidrológico de bacias hidrográficas por meio do Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). As ações desse Programa são dedicadas à conservação da mata nativa, à recuperação, reflorestamento e arranjos florestais que conciliam a prestação de serviços ecossistêmicos com a geração de renda para o produtor rural – Sistemas Agroflorestais (SAF) (SOSSAI et al., 2016).

As agroflorestas se constituem em solução prática para o aumento da cobertura florestal em áreas já desmatadas, degradadas e de agricultura consolidada, principalmente, por comunidades que dependem do cultivo agrícola. De acordo com Bene e Beall (1977 *apud* MICCOLIS et al., 2016), sistemas agroflorestais (SAFs) consistem no “manejo sustentável da terra que busca aumentar a produção de forma geral, combinando culturas agrícolas com árvores e plantas da floresta e/ou animais, simultânea ou sequencialmente, e aplica práticas de gestão que são compatíveis com os padrões culturais da população local”.

No contexto da restauração florestal, os sistemas agroflorestais podem fornecer uma série de serviços ecossistêmicos associados à cobertura florestal natural, como o controle de erosão, o aumento da fertilidade do solo, a promoção da biodiversidade e a ciclagem de nutrientes (GUERRA, 2014; HAYATI; RANJBAR; KARAMI, 2011; MWANGI et al., 2016; ONG et al., 2014). Do ponto de vista hidrológico, florestas/agroflorestas são ainda capazes de atenuar as vazões de cheias nos rios, contribuir para o fluxo de base – principalmente nos períodos de estiagem (ONG et al., 2014; TUCCI; CLARKE, 1997; VOGL et al., 2017) – e melhorar a qualidade das águas, reduzindo o aporte de sedimentos.

A adoção de SAFs possui potencial de interferência sobre a condição hidrológica¹ das bacias hidrográficas. Portanto, compreender como e o quanto as práticas agroflorestais afetarão esses processos é também importante para uma gestão dos recursos hídricos e de paisagens mais adequadas. Deste modo, a modelagem hidrológica constitui-se numa importante ferramenta utilizada para compreender e representar os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica. Além de serem adaptáveis às pequenas, médias e grandes bacias, considerando que para grandes escalas o estudo com bacias experimentais não é factível (BAYER, 2014). Os modelos são capazes de envolver uma diversidade de aspectos (grande variabilidade de classes de solo e de uso e cobertura florestal, ações antrópicas, práticas de manejo), possibilitando também a previsão de condições diferentes das observadas por meio da utilização de cenários de simulação (TUCCI, 1998). No contexto hidrológico, a utilização do modelo SWAT é crescente para a avaliação de serviços ecossistêmicos relacionados à disponibilidade hídrica (HALLOUIN et al., 2018; HERNÁNDEZ-MORCILLO et al., 2018). Considera-se que a utilização do SWAT pode fornecer detalhes importantes sobre as respostas hidrológicas de uma região, podendo subsidiar a determinação da condição hidrológica de bacias hidrográficas (FRANCESCONI et al., 2016; SCHMALZ et al., 2016; ULLRICH; VOLK, 2009).

Neste contexto, o presente trabalho busca avaliar a influência de SAFs sobre a condição hidrológica de bacias hidrográficas, por meio de indicadores obtidos a partir de variáveis do modelo SWAT, com vistas a ampliar o conhecimento acerca da adoção desses sistemas sobre a disponibilidade hídrica.

¹ Neste trabalho, entende-se como condição hidrológica a resposta hidrológica em quantidade de água decorrente e associada aos diferentes componentes do ciclo hidrológico impactados pelas alterações da cobertura florestal em bacias hidrográficas (escoamento superficial, evapotranspiração, infiltração, umidade relativa do solo, entre outros).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência de sistemas agroflorestais sobre a condição hidrológica de bacias hidrográficas, no contexto da disponibilidade hídrica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Objetivo específico 1 – Avaliar como melhor representar a condição hidrológica.

Objetivo específico 2 – Avaliar a influência sistemas agroflorestais sobre a disponibilidade hídrica.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste item, são apresentados elementos que subsidiam/fundamentam o entendimento de aspectos que envolvem o desenvolvimento deste Trabalho, sendo eles: o papel da cobertura florestal sobre os recursos hídricos; sistemas agroflorestais; modelagem hidrológica de alteração de uso e ocupação do solo; e a aplicação do modelo SWAT, com destaque para a simulação de Sistemas Agroflorestais.

3.1 O PAPEL DA COBERTURA FLORESTAL SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS

De acordo com Tucci (1997), os primeiros estudos conclusivos que buscavam avaliar os impactos das alterações da cobertura florestal e do manejo do solo sobre os processos hidrológicos indicaram que: as reduções das florestas produzem aumentos na quantidade de água escoada na superfície do solo; a substituição de uma área de vegetação escassa por uma cobertura florestal provoca uma diminuição na quantidade de água escoada superficialmente. Outros estudos posteriores, que incluíram ampla revisão da literatura (BACELLAR, 2005; BAYER, 2014; BESERRA, 2016; LAURANCE et al., 2017), encontraram resultados semelhantes e se aprofundaram na descrição dos diferentes processos e aspectos influenciados pelas alterações da cobertura florestal sobre os recursos hídricos. Nos tópicos subsequentes é apresentada uma breve descrição de cada um deles.

3.1.1 Precipitação

Em escala regional, o declínio da evapotranspiração, pelo desmatamento ou fragmentação de florestas, pode reduzir as chuvas e cobertura de nuvens, por outro lado, tende a aumentar o albedo e as temperaturas da superfície do solo. É até possível que a perda e a fragmentação moderadas da floresta possam aumentar a precipitação regional líquida no curto prazo (LAURANCE et al., 2017). Contudo, os cenários de desmatamentos reduzem a evapotranspiração, enquanto nos reflorestamentos se observa o seu aumento. Entende-se que essas modificações, quando ocorrem em grandes escalas, podem exercer influência na circulação atmosférica e, conseqüentemente, nas precipitações (BACELLAR, 2005; BAYER, 2014; TUCCI; CLARKE, 1997).

3.1.2 Intercepção

A intercepção é a diferença entre a quantidade de precipitação incidente e a que atinge o solo (BESERRA, 2016; GIGLIO; KOBİYAMA, 2013). A intercepção das chuvas pelo dossel da vegetação é medida em função do potencial de evaporação e da capacidade de armazenamento de água (SARI; PAIVA; PAIVA, 2016). Este processo depende da área ocupada pelas copas das árvores, das características das folhas, da precipitação incidente e do escoamento pelo tronco. Por isso, sua mensuração é complexa e completamente dependente da cobertura florestal e, de modo geral, os estudos que avaliam este componente se concentram em florestas tropicais, para as quais se estima que a intercepção corresponda a,

aproximadamente, 13% da precipitação anual incidente (NOGUEIRA; AUGUSTIN; ARANHA, 2012).

3.1.3 Evapotranspiração

A evapotranspiração é um processo fortemente vinculado à disponibilidade de energia, circulação atmosférica, umidades do ar e solo e tipo de vegetação. A evapotranspiração é composta pelos processos de evaporação da água do solo e de transpiração das plantas, sendo que esta última constitui da vaporização da água controlada pela abertura dos estômatos e pela capacidade do sistema radicular de captar água do solo. Por isso é o fenômeno mais impactado pela cobertura florestal (BAYER, 2014). Além disso, sua magnitude, geralmente, supera a dos outros componentes do ciclo hidrológico, como recarga de aquíferos e escoamento superficial (CASTRO, 2013; SAJKUMAR; REMYA, 2015; TUCCI; CLARKE, 1997), podendo corresponder até a 70% do volume precipitado. Ações que promovem a retirada de florestas reduzem a capacidade de interceptação, logo, de volume de água evaporada. Por outro lado, a vegetação pode ser capaz de retirar água de camadas mais profundas do solo, mantendo a evapotranspiração também nos períodos de estiagem (BACELLAR, 2005; BAKER; MILLER, 2013; BESERRA, 2016; LOTZ; OPP; HE, 2017). Estudos realizados na floresta Amazônica, por exemplo, demonstram que culturas e pastagens possuem taxas de evapotranspiração bem mais baixas que as das florestadas, fazendo com que estas áreas sejam mais quentes e secas.

3.1.4 Escoamento superficial

De acordo com Lelis (2011), a duração e intensidade das chuvas contribuem para maior ou menor escoamento superficial, além de que fatores como a declividade, manejo e cobertura do solo também influenciam na velocidade e no volume do escoamento superficial. No que se refere a cobertura florestal, as áreas desmatadas que passam por processo de reflorestamento tendem a reduzir o escoamento superficial, enquanto áreas desmatadas o escoamento superficial é aumentado (BESERRA, 2016; LELIS, 2011; TUCCI; CLARKE, 1997).

3.1.5 Infiltração

A infiltração consiste no processo de passagem da água da superfície para o solo. É também um processo altamente dependente do tipo de uso e da cobertura do solo, bem como da textura e estrutura do solo (ANTONELI; THOMAZ, 2009; BAKER; MILLER, 2013), que permite o movimento de redistribuição da água pelos perfis do solo, referida como percolação (ARROIO JUNIOR, 2016). Solos com cobertura florestal, normalmente, alta taxa de infiltração, o que diminui o escoamento superficial. Em solos desmatados, ou cobertos por pastagens, por exemplo, a capacidade de infiltração é reduzida na camada superior do solo, resultando em maior escoamento superficial durante e/ou após os eventos de precipitação (BESERRA, 2016). Devido à capilaridade, solos apresentam maior taxa de infiltração quando estão secos. Nesse sentido, solos cobertos por florestas apresentam menor umidade antecedente devido à captação radicular das árvores, dessa forma, a infiltração é aumentada

(ANTONELI; THOMAZ, 2009; BAKER; MILLER, 2013; BESERRA, 2016; ONG et al., 2014; SAJIKUMAR; REMYA, 2015).

3.1.6 Fluxo de base

O fluxo de base é a contribuição das águas subterrâneas de aquíferos rasos para a vazão nos cursos d'água. A percolação que ultrapassa o final da zona de raízes pode ser dividida em duas frações, cada fração se torna uma fonte de abastecimento para um dos aquíferos (raso e profundo). Além de repor a fluxo de água, a água armazenada no aquífero raso pode reabastecer a umidade no perfil do solo em condições muito secas ou, ser diretamente absorvida pela planta (NEITSCH et al., 2011a). De acordo com Beserra (2016), o fluxo de base pode aumentar ou diminuir com o desmatamento, ou reflorestamento, por ser muito dependente de características específicas da região, devido às complexidades e interferências dos componentes do ciclo hidrológico. A redução da vegetação pode aumentar o fluxo de base, devido à redução da evapotranspiração, enquanto que cobertura florestais com presença de vegetação de raízes mais profundas, implicam em maior fluxo de base.

3.1.7 Vazão

Os efeitos da cobertura florestal sobre as **vazões médias** variam em função das características das plantas, em um padrão de decréscimo de influência, seguindo a ordem de florestas coníferas, vegetação lenhosa decídua, capoeiras e pastagens, onde o desmatamento provoca um aumento da vazão média e o reflorestamento uma diminuição (ÖZTÜRK; COPTY; SAYSEL, 2013). As **vazões máximas** estão relacionadas aos eventos de cheias, inundações, enxurradas, entre outros processos que produzem impactos sociais e econômicos (HERZOG; ROSA, 2010; KROLL; CROTEAU; VOGEL, 2015). De modo geral, o desmatamento produz aumento do escoamento superficial e, conseqüentemente, das vazões de pico durante as precipitações (BAYER, 2014). Por outro lado, o reflorestamento promove a atenuação destes eventos, devido à retenção de boa parte dos volumes precipitados. Já as **vazões mínimas** podem tanto diminuir, quanto aumentar, com o reflorestamento ou desmatamento (BAYER, 2014; BESERRA, 2016). As vazões mínimas são características de períodos de estiagem e maior demanda de uso, além de serem extremamente importantes para proteger os habitats aquáticos. Geralmente, as vazões mínimas são mais dependentes do fluxo de base, que é altamente variável, devido à complexidade dos componentes do ciclo hidrológico e às características específicas da bacia (BAYER, 2014).

3.1.8 Solos

Regiões florestadas apresentam maior permeabilidade devido a fatores como deterioração de raízes, presença de microrganismos e de pequenos animais, redução da densidade do solo devido à presença de matéria orgânica, além da transpiração das plantas reduzirem a umidade no solo (ABDO; VALERI; MARTINS, 2009; BAYER, 2014; CONCEIÇÃO, 2014; MARCHIORO, 2008; SANTOS, 2010). Por outro lado, alterações do uso e ocupação do solo para atividades como agricultura, pastagens, silvicultura, pecuária, até mesmo recreação, podem compactar ou erodir o solo ao longo do tempo, principalmente em função do manejo

inadequado, pelo uso excessivo de máquinas agrícolas, pelo excesso de animais de grande porte, entre outros (ABDO; VALERI; MARTINS, 2009; BAYER, 2014; CONCEIÇÃO, 2014; MARCHIORO, 2008; SANTOS, 2010).

3.1.9 Manejo Florestal

O desmatamento, a extração seletiva de madeira, o plantio de subsistência, o emprego de culturas permanentes e anuais, além da agropecuária e urbanização, são os principais usos do solo em bacias hidrográficas (BACELLAR, 2005). Bezerra (2016) aponta que a substituição da cobertura florestal natural por pastagens ou culturas agrícolas aumenta o escoamento superficial, contudo, isso não pode ser considerado um benefício ambiental, haja vista a importância das florestas para a manutenção da biodiversidade, manutenção da qualidade da água e proteção do solo contra a erosão e o transporte de sedimentos.

A adoção de práticas de manejo sem o cuidado com a conservação da cobertura florestal em regiões estratégicas para os recursos hídricos, e sem o manejo adequado do solo, tende a aumentar consideravelmente os processos erosivos e de compactação do solo, além de provocar outros prejuízos para os processos hidrológicos já mencionados. Nesse sentido, para bacias hidrográficas onde a cobertura florestal natural é substituída por cultivos agrícolas, é recomendada a adoção de boas práticas de manejo do solo, que agreguem a proteção dos recursos naturais à produtividade (ALBUQUERQUE et al., 2002; BACELLAR, 2005).

3.2 SISTEMAS AGROFLORESTAIS

Sistemas Agroflorestais (SAFs) consistem no “manejo sustentável da terra que busca aumentar a produção de forma geral, combinando culturas agrícolas com árvores e plantas da floresta e/ou animais, simultânea ou sequencialmente, e aplica práticas de gestão que são compatíveis com os padrões culturais da população local” (BENE; BEALL, 1977 *apud* MICCOLIS et al., 2016).

A adoção de SAFs é uma estratégia na restauração e recuperação de áreas alteradas e degradadas que concilia a conservação com benefícios sociais (MICCOLIS et al., 2016), comportando-se de forma semelhante às florestas regeneradas, apresentando diferentes níveis de estratificação – alturas em relação a outras plantas - (Figura 1) e biodiversidade, com manejo intensivo. Nessas associações, podem ser combinadas às espécies agrícolas, espécies nativas remanescentes, em estágios de regeneração e reflorestadas, permitindo uma gama de combinações.

Figura 1: Estratificação de um SAF.



Fonte: Miccolis et al. (2016).

Em um SAF, cada espécie possui um estrato que se refere à altura em relação às outras plantas e à necessidade de recebimento de luz na fase adulta (RIBASKI; MONTOYA; RODIGHERI, 2001). Esse aspecto é importante porque quando diferentes espécies de diferentes estratos são combinadas à ocupação no espaço é otimizada e melhora o aproveitamento dos recursos, sejam eles água, luz, nutrientes, microrganismos (MICCOLIS et al., 2016; PARRON et al., 2015). Desta forma, o estabelecimento do SAF tende a ser mais satisfatório (RODRIGUES, R. R.; BRANCALION; ISERNHAGEN, 2009).

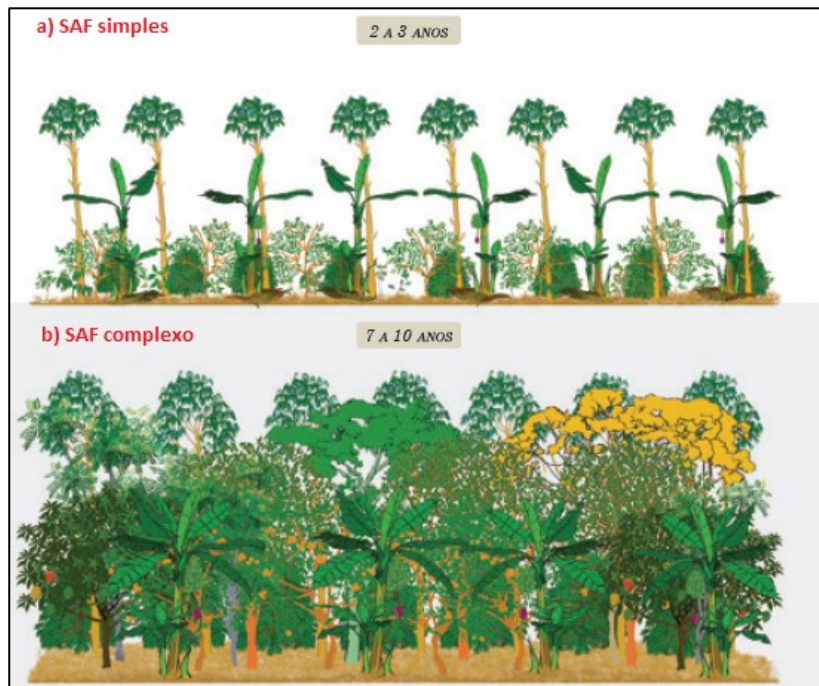
Entre as formas de classificação dos sistemas agroflorestais, a mais comum é feita em função do componente florestal e de acordo com os seguintes critérios: estrutural, funcional, socioeconômico e ecológico (NAIR, 1985 apud SANTOS, 2011). Utilizando-se desses critérios como base para agrupar os sistemas, os SAFs podem ser subdivididos conforme a natureza e arranjo de seus componentes. De acordo com a natureza, os SAFs podem ser classificados como: agrossilviculturas (espécies florestais e culturas agrícolas); silvipastoril (espécies florestais e forrageiras para alimentação animal ou espécies florestais, forrageiras e animais); e agrossilvipastoril (espécies florestais, culturas agrícolas e forrageiras para alimentação animal) (ALVES, 2014).

No que se refere ao arranjo dos componentes, é importante destacar que as combinações de espécies também envolvem as dimensões de tempo e espaço, assim, o arranjo espacial varia de sistemas de baixa densidade (SAF simples) a sistemas mistos adensados (SAF complexo) (Figura 2). Na Figura 2a, o SAF simples é formado por reduzida quantidade de espécies, com estrutura de fileiras bem marcada, com preservação dos principais estratos, enquanto que o SAF complexo ilustrado (Figura 2b) é mais biodiversificado, com diferentes espécies presentes nos diferentes estratos. Esse tipo de sistema geralmente é manejado de acordo com a lógica de sucessão natural (MICCOLIS et al., 2016).

Além disso, os sistemas podem ser dispostos em fileiras (Figura 3) ou zonas de diferentes larguras e espaçamentos, como os quintais florestais, frequentemente observados em pequenas propriedades rurais (Figura 4), podendo ser microzonais (ruas ou fileiras alternadas)

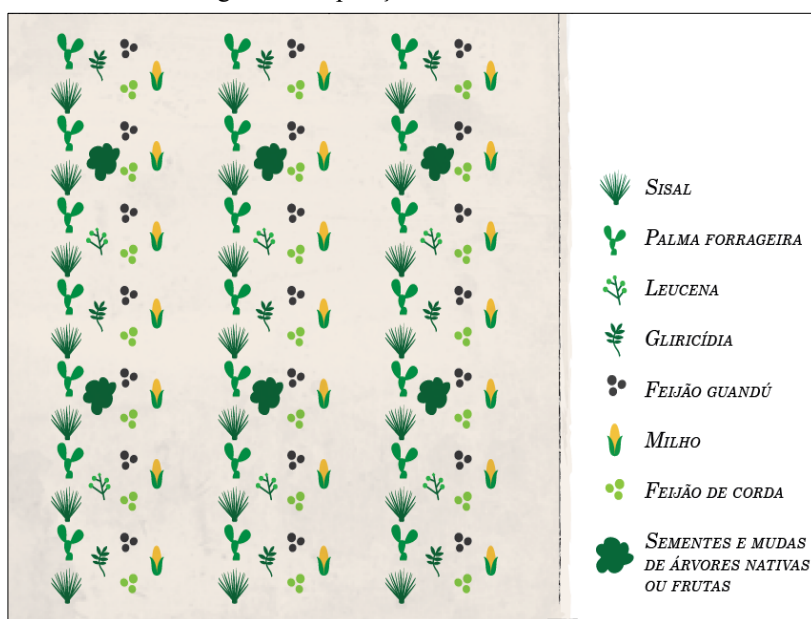
(Figura 3), macrozonais ou contínuos. Quanto à disposição das espécies no tempo, os sistemas podem ser simultâneos ou sequenciais, com a introdução de espécies com o passar do tempo, de forma programada (Figura 5) (MICCOLIS et al., 2016).

Figura 2: Evolução no tempo de SAF sucessional com manejo intensivo: a) SAF Simples; b) SAF Complexo.



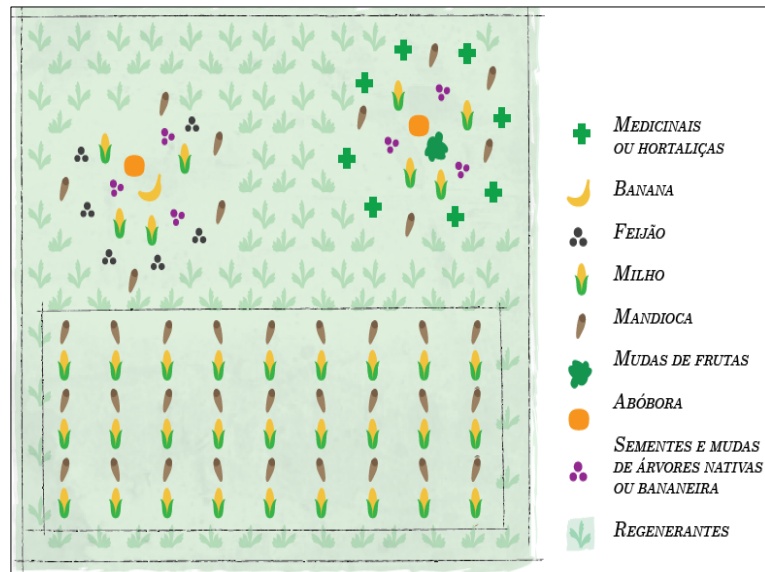
Fonte: Miccolis et al. (2016).

Figura 3: Disposição de SAF em Fileiras.



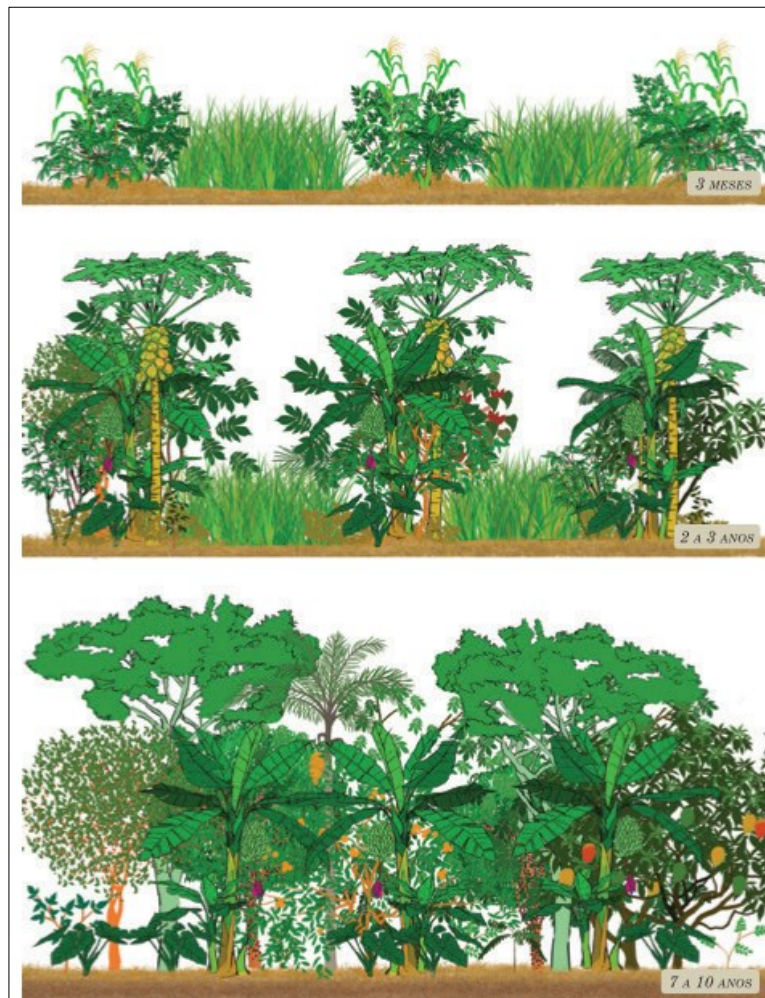
Fonte: Miccolis et al. (2016).

Figura 4: Disposição de SAF no formato de Quintal florestal.



Fonte: Miccolis et al. (2016).

Figura 5: Sistema agroflorestal sequencial em três estágios.



Fonte: Miccolis et al. (2016).

Atualmente, o tipo de sistema mais utilizado é o plantio em fileiras ou faixas (MICCOLIS et al., 2016; RIBASKI; MONTOYA; RODIGHERI, 2001) (Figura 3), por permitir uma melhor ocupação da propriedade e facilitar a sistematização do tratamento da cultura e da colheita, com operações de manejo de capina seletiva e podas periódicas (MEDRADO, 2000). O manejo de SAFs objetiva recuperar, manter ou aumentar a produtividade do sistema, preservando a capacidade produtiva sustentável do ecossistema, como o balanço de nutrientes e o suprimento de água (AMADOR; VIANA, 1998; SILVA et al., 2015). O manejo abrange inúmeras práticas que envolvem a manipulação da vegetação, do solo e dos animais (ALVES, 2014):

- O manejo das plantas é definido tanto pela escolha das espécies, em que são consideradas suas especificidades em relação às condições ambientais, culturais e econômicas, quanto pelo arranjo espacial (com regeneração natural ou artificial) e temporal. De modo geral, os arranjos dependem de vários aspectos, incluindo as espécies associadas, a função de cada componente do sistema, ciclos dos nutrientes, tratamentos culturais previstos, produtos a serem gerados, entre outros;
- O manejo do solo em sistemas agroflorestais objetiva à redução de perdas de solo e de nutriente por erosão e lixiviação. Desse modo, as técnicas empregadas devem manter o solo coberto por vegetação ou resíduos vegetais na maior parte do ano, conservar matéria orgânica nas camadas superficiais do solo, manter sistema de raízes que promovam a ciclagem de nutrientes, minimizar as perdas de matéria orgânica nas etapas de colheita e evitar queimadas (AMBIENTE BRASIL, s.d.);
- Já no manejo animal, deve-se observar, principalmente, o potencial de compactação do solo, a capacidade de suporte da pastagem e a variedade de fonte alimentar e suprimento de água, além do cuidado com a inserção de espécies exóticas.

Em estudo realizado por Miccolis et al. (2016), são apresentadas opções de adoção de SAFs voltadas para diferentes contextos, baseados, sobretudo, em experiências no Cerrado brasileiro, com orientações das técnicas de manejo de SAFs. Dentre eles, citam-se: agrofloresta sucessional; agrofloresta diversa para restauração de Área de Preservação Permanente (APP); agroflorestas em faixas intercaladas; enriquecimento e manejo de capoeiras (regeneração natural) com agrofloresta; agroflorestas para restauração de áreas degradadas com espécies adubadeiras; restauração em áreas de declive com agroflorestas; agroflorestas para restauração de áreas de declive ou de reserva legal; e sistema agroflorestal forrageiro. O Quadro 1 apresenta uma descrição destas diferentes opções de SAFs estudadas.

Quadro 1: Caracterização de diferentes opções de SAFs.

OPÇÃO	CONTEXTO	OBJETIVOS	MANEJO	MANEJO EM LONGO PRAZO
Agrofloresta sucessional	Solo degradado, baixa regeneração, predominância de gramíneas exóticas; solo bem drenado, reserva legal (RL) ou áreas de produção, alta disponibilidade de mão de obra, fácil acesso ao mercado	Objetivo Principal: produção para o mercado. Objetivos secundários: segurança alimentar e restauração da vegetação.	O manejo desse sistema é fundamentado na concentração de biomassa, principalmente por meio da poda das árvores e bananeiras, cujo material é cortado ou triturado e disposto como cobertura do solo	Dossel aberto e acúmulo de biomassa durante os 5 primeiros anos de manejo intensivo. Dependendo da situação, as árvores adubadeiras podem continuar a ser podadas por alguns anos a fim de manter a produção das linhas de frutíferas.
Agrofloresta diversa para restauração de APP	Solo de média a alta fertilidade; baixa regeneração; predominância de gramíneas exóticas tais como braquiria, colômbio, napier; drenagem boa ou média; APP de mata ciliar; baixa a média disponibilidade de mão de obra; fácil acesso ao mercado.	Objetivo Principal: produção para mercado. Objetivos Secundários: segurança alimentar e restauração.	Capina seletiva e podas periódicas.	Floresta com dossel fechado após cerca de 7 a 10 anos, mesmo com a dinâmica de podas seletivas. O manejo deve favorecer o estabelecimento da regeneração natural, deixando-se as plântulas das árvores nativas que permitirão o avanço da sucessão ecológica.
Agroflorestas em faixas intercaladas	Solo de média fertilidade; alta regeneração; predominância de arbustos e plântulas com algumas árvores; drenagem boa; RL; disponibilidade de mão de obra variada (média ou baixa); acesso variado a insumos (alto, média ou baixa); existe acesso ao mercado.	Objetivo Principal: produção para mercado e consumo. Objetivos Secundários: restauração com enriquecimento das áreas de vegetação nativa.	Manejo intensivo nas faixas cultivadas e capina seletiva e poda nas faixas de regeneração natural visando o avanço sucessional	Uma vez que as árvores tiverem crescido, em cerca de 7 a 10 anos, o sistema pode ter o dossel fechado ou então pode ser renovado com a poda das árvores.
Enriquecimento e manejo de capoeiras (regeneração natural) com agroflorestal	Solo com média fertilidade; alta regeneração; predominância de arbustos e plântulas de árvores, com algumas árvores adultas; drenagem boa; APP ou RL; disponibilidade de mão de obra variada (alta, média ou baixa); há acesso ao mercado.	Objetivo Principal: restauração. Objetivos Secundários: segurança alimentar e produção para mercado.	Capina seletiva e podas periódicas visando o avanço da sucessão.	Floresta com dossel fechado após cerca de 5 anos, mesmo com a dinâmica de podas seletivas. Obs.: As espécies exóticas não devem ultrapassar 50% do total da área manejada.

OPÇÃO	CONTEXTO	OBJETIVOS	MANEJO	MANEJO EM LONGO PRAZO
Agroflorestas para restauração de áreas degradadas com espécies adubadeiras	Solo com baixa fertilidade; baixa regeneração; predominância de gramíneas e arbustos de estágios iniciais da sucessão como sapé, capim gordura, braquiária e assa-peixe; solos bem drenados; APP de mata ciliar e RL; disponibilidade de mão de obra variada (alta, média ou baixa); há acesso ao mercado.	Objetivo Principal: restauração. Objetivos Secundários: segurança alimentar e comercialização.	Uma vez estabelecidas, as espécies adubadeiras devem ser roçadas sistematicamente, geralmente três ou quatro vezes por ano no caso do margaridão e dos capins, e a matéria orgânica deve ser acumulada no canteiro (ou núcleos e ilhas) com culturas agrícolas e árvores cultivadas.	Depois de aproximadamente 5 a 7 anos de manejo, as plantas adubadeiras do início (gramíneas, leguminosas e outras) serão sombreadas e a fonte de biomassa será de árvores eficientes para essa função. As faixas das adubadeiras poderão, então, ser enriquecidas com espécies de sub-bosque.
Restauração em áreas de declive com agroflorestas	APP de declive ou RL; solos com baixa fertilidade, predominantemente rochosos e cascalentos; baixa a média regeneração; predominância de gramíneas e arbustos; disponibilidade de mão de obra baixa; acesso ao mercado baixo a médio.	Objetivo Principal: restauração. Objetivos Secundários: produção de alimentos, espécies medicinais e ornamentais.	Realizar capina seletiva e podar as leguminosas e o margaridão nos primeiros 3 anos. Acumular a biomassa nos terraços e ao redor das árvores introduzidas.	SAF com estrutura e função semelhantes à floresta nativa de declive, todavia com maior densidade de espécies frutíferas. Realizam-se desbastes de árvores que estiverem em grande densidade e poda seletiva das árvores remanescentes para manter a produção das espécies frutíferas implantadas.
Agroflorestas para restauração de áreas de declive ou de reserva legal	Solo com baixa a média fertilidade; baixa a média regeneração; predominância de arbustos, cactáceas e árvores de baixo porte; drenagem boa; RL; disponibilidade de mão de obra baixa, médio acesso ao mercado.	Objetivo Principal: convivência com o semiárido, produção de alimentos e outros produtos. Objetivos Secundários: restauração.	Realizar capina seletiva. Acumular a biomassa nos terraços e ao redor das árvores introduzidas. A partir do terceiro ano podam-se os agaves. O material das podas deve ser disposto cobrindo o solo ao redor das árvores mais preciosas.	SAF com estrutura e função semelhante à floresta nativa da Caatinga, todavia com maior densidade de espécies frutíferas e outras úteis.
Sistema agroflorestal forrageiro	Solo com média fertilidade; baixa a média regeneração; predominância de arbustos, cactáceas, e árvores de baixo porte; drenagem boa; RL ou APP; disponibilidade de mão de obra baixa; acesso ao mercado.	Objetivo Principal: convivência com o semiárido (produção de alimentos e geração de renda com foco na criação de animais). Objetivos Secundários: restauração.	Podas das árvores para cobertura do solo e produção de forragem (feno) para os animais. Introdução de espécies úteis (frutíferas, apícolas, madeireiras) por meio de estacas e sementes, incluindo as que vêm no esterco. As árvores são manejadas por meio de podas regulares para colheita de folhas e galhos finos para alimentação dos animais.	Realização de podas das árvores e cactáceas para produção de forragem e biomassa, de modo a deixar passar suficiente luz para o crescimento de espécies gramíneas e arbustivas no sub-bosque.

Fonte: Adaptado de Miccolis et al. (2016).

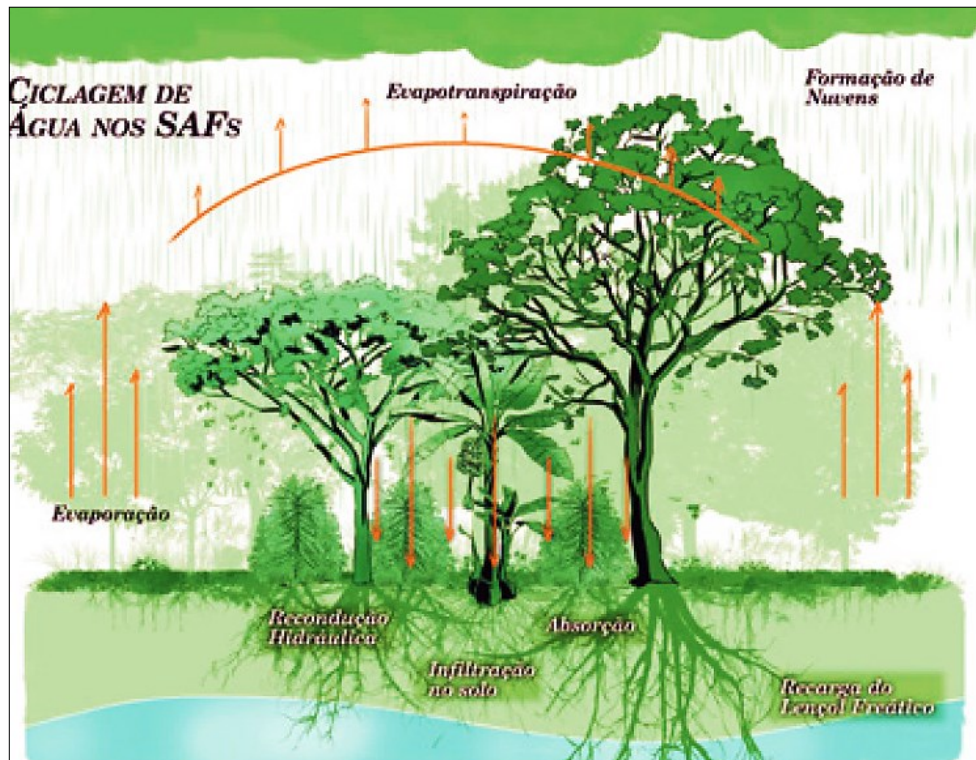
Conforme apresentado no Quadro 1, diferentes opções de SAFS são empregadas tendo como principais objetivos: produção para o mercado, segurança alimentar, restauração de paisagens florestais e enriquecimento das áreas de vegetação nativa. Ainda de acordo com Miccolis et al. (2016), a adoção de SAFs traz diversos benefícios/auxílios/contribuições: combate à desertificação; conservação do solo; restauração da fertilidade e estrutura do solo; sombra e criação de microclimas; aumento de produtividade animal por bem-estar (sombra) e qualidade nutricional das pastagens; favorece a biodiversidade de forma geral, incluindo a disponibilidade de agentes polinizadores; regulação de águas pluviais e melhoria da qualidade da água.

Observam-se, ainda, na literatura (HERNÁNDEZ-MORCILLO et al., 2018; ONG et al., 2014), funções agroflorestais que apoiam a mitigação e a adaptação às mudanças climáticas, como: acúmulo de carbono (C) na biomassa lenhosa; acúmulo de carbono (C) no solo; redução do consumo de combustível fóssil em equipamentos; redução das emissões de gás carbônico (CO₂) nas atividades agropecuárias; redução das emissões de óxido nitroso (N₂O) por maior absorção de nutrientes e redução de fertilizantes nitrogenados; redução de metano (CH₄), melhorando a qualidade da forragem; aumento da diversidade de habitats; aumento da diversidade estrutural e funcional do ambiente; promoção de oportunidades de produção diversificadas; redução dos impactos de eventos climáticos extremos; redução do estresse na flora e fauna; e fornecimento de corredores para movimentos de vida selvagem.

Quanto aos impactos dos diferentes SAFs sobre os componentes do ciclo hidrológico, observa-se que a escolha do componente florestal para compor os sistemas é determinante, uma vez que diferentes tipos de vegetação, disposição das espécies na propriedade e abrangência dos sistemas nas regiões hidrográficas resultam em diferentes capacidades de infiltração (MWANGI et al., 2016) e, conseqüentemente, diferentes volumes de escoamentos superficial.

A Figura 6 ilustra a influência dos sistemas agroflorestais sobre o ciclo hidrológico. Em que a cobertura agroflorestal está associada ao processo de evapotranspiração, sendo ilustrada a água que evapora das superfícies e transpiração da vegetação. Parte da água que precipita infiltra no solo, facilitada pelos sistemas radiculares das plantas. Esses sistemas, por sua vez, estão associados aos diferentes estratos (baixo, médio, alto e emergente). Sobre esse aspecto, nota-se que as plantas de estrato mais alto possuem raízes mais profundas, que contribuem para que a água infiltrada chegue a camadas mais profundas do solo, propiciando a recarga dos aquíferos. Além disso, as raízes também estão associadas a uma recondução hidráulica, em que as raízes são capazes de absorver água das camadas mais profundas para alimentação da vegetação (MICCOLIS et al., 2016).

Figura 6: Influência dos SAFs na manutenção dos recursos hídricos.



Fonte: Miccolis et al. (2016).

Diante das funções ecossistêmicas, a adoção de sistemas agroflorestais (SAFs) é incentivada em diferentes países no mundo com projetos e programas de incentivo à restauração das paisagens (DURIGAN; TOREZA, 2017; SOSSAI et al., 2016), enfrentamento e mitigação de impactos de mudanças climáticas (HERNÁNDEZ-MORCILLO et al., 2018) e desenvolvimento sustentável (FRANCESCONI et al., 2016; VOGL et al., 2016). Esses sistemas têm sido incluídos em metas de importantes programas que realizam Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) para estas finalidades ecossistêmicas, como é o caso programa do Programa Reflorestar, no Espírito Santo. Além disso, é importante considerar que o Novo Código Florestal (Lei 12.651/2012), traz a possibilidade de incluir SAFs, até mesmo, em áreas de Reserva Legal (RL) e APPs para recomposição florestal, em propriedades com até quatro módulos fiscais, como atividade de baixo impacto de base comunitária e familiar, no Brasil.

3.2.1 Programa Reflorestar

O Programa Reflorestar/ES, coordenado pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo (SEAMA), possui o intuito de contribuir para a restauração do ciclo hidrológico por meio da conservação e recuperação da cobertura florestal, com a geração de oportunidade de renda para o produtor rural, por meio do Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) para todo o Estado do Espírito Santo (SEAMA, 2011).

No Programa Reflorestar/ES, o PSA é empregado não apenas para reconhecer a mata nativa conservada, mas também recompensar pela sua recuperação e apoiar financeiramente o plantio de novas áreas com florestas nativas e com arranjos agroflorestais. Sendo esta última modalidade de grande interesse para o Programa, por entender que, mediante o início do retorno econômico proveniente dos arranjos florestais, os produtores rurais não retornariam ao uso degradante da propriedade, mantendo a sustentabilidade dos sistemas (SOSSAI et al., 2015). Em seus projetos de conservação e reflorestamento, o Programa faz uso de seis modalidades:

- Floresta em Pé: pagamento por florestas conservadas e elegíveis para essa modalidade, podendo ser reconhecida para fins de PSA até 10 hectares por propriedade rural;
- Regeneração Natural: aquisição de insumos necessários ao isolamento de uma área para que ocorra a sua recuperação natural, e PSA gerados;
- Recuperação com Plantio: aquisição de insumos necessários para o plantio de mudas de espécies nativas da Mata Atlântica e PSA;
- Sistemas Agroflorestais: aquisição de insumos necessários para implantação de sistemas que combinam espécies florestais com culturas agrícolas como café, cacau, palmito, banana, dentre outras;
- Sistemas Silvopastoris: aquisição de insumos necessários para implantação de sistemas que combinam árvores com pastagens;
- Floresta Manejada: aquisição de insumos necessários para implantação de culturas florestais para o manejo florestal (sem corte raso).

Adicionalmente, o Programa recomenda em seus projetos a adoção das práticas específicas de manejo do solo, tais como: roçada seletiva; controle das formigas cortadeiras; capina química seletiva; espaçamento / coroamento / coveamento / adubação de base (plantio de área total, plantio em ilhas e adensamento e enriquecimento) ; aplicação de hidrogel; e plantio e replantio de mudas. Todas estas ações apoiadas, se corretamente empregadas, tendem a garantir a sustentabilidade dos sistemas, mantendo uma produção satisfatória para o produtor rural, ao passo que protege e recupera a qualidade do solo e recursos hídricos da região hidrográfica.

A priorização de áreas a serem reflorestadas e/ou conservadas pelo Reflorestar são definidas de forma estratégica, considerando o potencial impacto sobre a disponibilidade hídrica / produção de água, bacias de abastecimento público, retenção de sedimentos, além da biodiversidade e a viabilidade financeira de implementação do Programa na região (SEAMA-ES, 2017).

Atualmente, o Programa tem, por um lado, incentivado a adoção de SAFs e outras modalidades de restauração, por outro, buscado o aperfeiçoamento das avaliações de desempenho do programa, e por considerar que um dos grandes obstáculos para a restauração das paisagens florestais seja a reduzida percepção e apropriação dos benefícios que esta atividade pode trazer para a sociedade (SEAMA-ES, 2017). Diferentes estudos foram realizados no âmbito do Programa para avaliação das oportunidades de restauração de paisagens e florestas para o Estado, com metodologias robustas como a ROAM (Metodologia

de Avaliação de Oportunidades de Restauração) (IUCN; WRI, 2014) e ferramentas de modelagem, como o *Integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs* (InVest) (TALLIS, 2011), para estimativa dos benefícios e serviços ecossistêmicos² propiciados pela restauração florestal, principalmente, pelo potencial acúmulo de carbono. Entretanto, compreendendo a importância das ações de reflorestamento para o ciclo hidrológico natural, percebeu-se uma carência de estudos específicos que indiquem os impactos das ações do Programa sobre a disponibilidade hídrica das bacias de atuação.

3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA DE ALTERAÇÃO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A maioria dos estudos que buscam a representação do impacto da cobertura vegetal sobre o escoamento está baseada no monitoramento de pequenas bacias experimentais. Os estudos podem ser: de correlação, de uma única bacia e de bacias pareadas. No entanto, a capacidade de avaliar os processos hidrológicos que resultam na resposta da bacia hidrográfica por meio de bacias experimentais pode ser limitada. Estes métodos são, geralmente, empregados em microbacias (inferior a 1km²) e podem não considerar a influência da variabilidade espacial e temporal de clima e, ainda, necessitar de longos períodos de monitoramento (BAYER, 2014; SEIBERT; MCDONNELL, 2010; TUCCI; CLARKE, 1997).

Visando superar essas limitações, a modelagem hidrológica constitui-se numa importante ferramenta utilizada para compreender e representar os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica. Além de serem adaptáveis às pequenas, médias e grandes bacias, onde o estudo com bacias experimentais não é factível, os modelos são capazes de envolver uma diversidade de aspectos (grande variabilidade de classes de solo e de uso e cobertura florestal, ações antrópicas, práticas de manejo) na composição dos dados (SEIBERT; MCDONNELL, 2010), possibilitando também a previsão de condições diferentes das observadas por meio da utilização de cenários de simulação (TUCCI, 1998).

Os modelos podem ser classificados de acordo com diferentes critérios. Podem ser classificados quanto à escala temporal, variabilidade espacial, ao emprego ou não de estatísticas para compor os resultados e quanto à consideração dos processos físicos. Assim, podem ser **contínuos**, quando os fenômenos são contínuos no tempo, ou discretos, quando as mudanças se dão em intervalos discretos; **concentrados**, quando não leva em consideração a variabilidade espacial das características da região; **distribuídos**, quando as variáveis e parâmetros são dependentes do tempo e do espaço; **estocásticos**, quando as chances de ocorrência das variáveis são relevantes, e são considerados cálculos de probabilidade em sua formulação; e **determinístico**, quando segue um padrão definido, desconsiderando a probabilidade de ocorrência. Podem ainda ser **conceituais**, quando levam em consideração dos processos físicos na sua formulação, e **empíricos** quando o ajuste dos cálculos é realizado

² Quando as funções ecossistêmicas passam a ser combinadas com algum capital e geram um tipo de benefício usufruído, direta ou indiretamente pelo ser humano, impactando em seu bem-estar e qualidade de vida, este passa a ser considerado como um Serviço Ecossistêmico” (MONTALVÃO, 2016).

através de funções sem relação com o processo físico envolvido no sistema (FAN et al., 2016; DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015; FAN; RAMOS; COLLISCHONN, 2015; TUCCI, 1998).

Para estudos de previsão de respostas hidrológicas em cenários de uso e cobertura do solo é preferível a utilização de modelo de base física, por ser mais adequado para representar a complexidade dos processos hidrológicos envolvidos e permitir a parametrização para as condições futuras de uso e manejo do solo. Quando se deseja detectar alterações do uso e ocupação do solo, é necessário um modelo que seja capaz de informar as vazões que teriam sido observadas caso não houvesse ocorrido nenhuma mudança e, neste caso, é possível o uso de modelos conceituais, mais simples que os de base física. De acordo com Tucci (1998), os aspectos mais importantes a serem considerados na escolha de um modelo são os objetivos para os quais o modelo será utilizado; as limitações na representação dos processos; e a qualidade e quantidade das informações inseridas.

Os modelos comumente utilizados para representar os processos hidrológicos, em cenários de alteração do uso e ocupação do solo, são os do tipo chuva-vazão (FAN et al., 2016). Esses modelos descrevem a distribuição espacial da precipitação, perdas por interceptação e evaporação, processos de infiltração, percolação e água subterrânea, escoamentos subsuperficial e superficial, além da propagação no canal. A estrutura do modelo é baseada na discretização da bacia (forma de divisão da bacia em unidades menores), na qualidade e disponibilidade das variáveis de entrada (físicos e climatológicos), na estrutura de integração entre os processos que ocorrem na fase terrestre e de propagação no canal, bem como a definição dos parâmetros utilizados (TUCCI, 1998).

Alguns modelos têm sido frequentemente utilizados para avaliar os impactos da alteração do uso e ocupação do solo/cobertura florestal, sobre os processos hidrológicos, principalmente, o impacto sobre o regime de vazões. Dentre eles podem ser destacados *Soil and Water Assessment Tool* - SWAT (BERTANI, 2014; LOPES, 2008; LOTZ; OPP; HE, 2017; MARCHIORO, 2008; NGUYEN et al., 2017; RODRIGUES, E. L., 2013; SAJIKUMAR; REMYA, 2015), *System Hydrologique European* - MIKE-SHE model (ÖZTÜRK; COPTY; SAYSEL, 2013), *Hydrologiska Bryans Vattenavdelning model* - HBV model (SEIBERT; MCDONNELL, 2010), TOPMODEL (CHEN, J.; WU, 2012) e *Variable Infiltration Capacity model* - VIC model (KAUFFELDT et al., 2016), Modelo de Grandes Bacias - MGB-IPH (BAYER, 2014; BESERRA, 2016; CARAM, 2010; PAZ et al., 2013; RUHOFF et al., 2012).

O modelo MIKE-SHE é de base física, com distribuição espacial dos parâmetros e variáveis, válido para uma ampla gama de aplicações. Contudo é um modelo complexo, que exige capacidade computacional do modelador e grande volume de dados de entrada, não apresentando bons resultados para pequenas bacias (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015). Os modelos HBV e TOPMODEL são modelos conceituais, que incluem equações semi-empíricas com base física. São considerados simples, de fácil manipulação, porém requerem longos períodos de dados meteorológicos e hidrológicos. Ambos os modelos apresentaram bons resultados em bacias de solo raso e topografia moderada (CHEN, J.; WU, 2012; SEIBERT; MCDONNELL, 2010). VIC é um modelo hidrológico semi-distribuído, que

apresenta bom desempenho em áreas úmidas e simulações de manejo de água para agricultura (KAUFFELDT et al., 2016).

O MGB-IPH é um modelo de grande escala (bacias com áreas superiores a 1.000 km²), distribuído, de equações físicas e conceituais, que tem apresentado bons resultados de aplicação em grandes bacias da América do Sul, em estudos de previsão de vazões (FAN et al., 2017), simulações hidráulicas e hidrológicas (PONTES, Paulo R M et al., 2015; PONTES et al., 2017), susceptibilidade à erosão (OLIVEIRA et al., 2012), alterações de uso e ocupação do solo (BAYER, 2014). Entretanto, possui limitações de aplicação em pequenas bacias.

O SWAT é um modelo conceitual, de base física, semi-distribuído e complexo. Requer esforço computacional do modelador. Tem sido largamente utilizado em estudos em diferentes regiões no mundo (FRANCESCONI et al., 2016), apresentando bons resultados em diferentes escalas de bacia (ARNOLD et al., 1998; HAVRYLENKO et al., 2016; ULLRICH; VOLK, 2009). Também utilizado em estudos de regiões tropicais (CAIADO, 2005; FUKUNAGA et al., 2015).

Adicionalmente, sob a ótica do planejamento territorial, há outros modelos, que simulam alterações de uso e ocupação do solo. E são frequentemente utilizados para quantificar os serviços ecossistêmicos das florestas e arranjos florestais, bem como subsidiar os processos de tomada de decisão dos gestores e formulação de políticas ambientais. Entre eles: *Multi-scale Integrated Model of Ecosystem Services* - MIMES (TÔSO et al., 2008); *Artificial Intelligence for Ecosystem Services* - ARIES (VILLA et al., 2009), *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs* - InVEST (SILVA et al., 2015; CONCEIÇÃO, 2014; TALLIS, 2011). Entretanto, estes modelos apresentam limitações de simplificação dos ciclos e processos naturais, não permitindo, por vezes, aprofundar no detalhamento dos resultados das variáveis.

De modo geral, nenhum modelo reproduz perfeitamente os processos hidrológicos. As diferenças entre os resultados modelados e os observados não estão, necessariamente, relacionadas a erros do modelo, mas a diversos outros aspectos, tais como a variabilidade natural das características da bacia, dados de entrada, estrutura do modelo e estimativa dos parâmetros, além das simplificações realizadas durante a modelagem (TUCCI, 1998). Assim, a efetividade do modelo hidrológico deve ser investigada por meio de análise de sensibilidade, detectando aqueles parâmetros que melhor representam o processo hidrológico estudado (BESERRA, 2016).

Para a avaliação da alteração do uso e ocupação do solo por adoção de SAFs, a utilização de modelos mais robustos pode ser considerada uma boa alternativa, quando for necessário ampliar a compressão dos processos hidrológicos para o planejamento de uso e ocupação do solo, com vistas à avaliação dos serviços ecossistêmicos. A aplicação do SWAT, nesses casos, é crescente na literatura, principalmente, para avaliação de produção de água em bacias hidrográfica, rendimento de biomassa de culturas (FRANCESCONI et al., 2016; MONTALVÃO, 2016) e identificação de aporte de sedimentação nos corpos d'água (KROEGER et al., 2017).

3.4 MODELO SWAT

O SWAT foi desenvolvido pelo *Agricultural Research Service* (ARS), em Temple, no Texas, Estados Unidos da América. É um modelo que permite a avaliação de diferentes processos, a partir de parâmetros espacialmente distribuídos. Foi desenvolvido para prever o impacto do uso e ocupação do solo e manejo nos rendimentos de água, sedimentos e químicos agrícolas em bacias hidrográficas, bem como para simulação da qualidade e quantidade de recursos hídricos em bacias complexas e de diferentes escalas. O modelo se destaca por ser computacionalmente eficiente e capaz de simular de forma contínua ao longo do tempo, possibilitando a avaliação de impactos de mudanças de longo prazo (ARNOLD et al., 1998; NEITSCH et al., 2011b; SRINIVASAN; ARNOLD; JONES, 1998).

A aplicação do modelo SWAT requer entrada de diferentes tipos de dados físicos e climáticos: Modelo Digital de Elevação (MDE); mapas pedológicos e de uso e ocupação do solo, dados diários de precipitação, temperatura, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Elementos adicionais, como eventuais lançamentos, reservatórios, retiradas de água e informações sobre manejo, também podem ser inseridos, conforme a necessidade do modelador.

A primeira etapa da simulação hidrológica pelo SWAT consiste na subdivisão da região hidrográfica de estudo em sub-bacias que, por sua vez, são divididas em unidades menores denominadas unidades de resposta hidrológica (HRU). Cada HRU possui uma combinação única de tipos de solo, uso de solo e declividade (NEITSCH et al., 2011b). Para a simulação dos processos, o ciclo hidrológico é segmentado em duas fases, uma terrestre e outra de água ou propagação do escoamento.

As simulações dos processos que serão realizadas na fase terrestre se baseiam na equação de balanço hídrico (Equação 3), em que são considerados os processos de interceptação, evapotranspiração, infiltração, percolação, recarga, fluxo de superfície, fluxo lateral, retorno e água subterrânea. Nesse percurso, também se considera a fase de propagação do escoamento através das vertentes e da rede de drenagem, até o exutório de cada sub-bacia.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (1)$$

Em que: SW é o teor de água do solo, t é tempo em dias e R , Q , ET , P e QR são quantidades de precipitação diária, escoamento, evapotranspiração, percolação e fluxo de retorno, respectivamente. Todas as unidades estão em milímetros.

Para os cálculos de evapotranspiração, os métodos oferecidos pelo SWAT são *Penman-Monheinth*, *Priestley-Taylor* e *Hargreaves*. Sendo que, o método de *Penman-Monteith* é amplamente utilizado em estudos que avaliam o impacto de alteração de uso e ocupação do solo (MWANGI et al., 2016; RODRIGUES, E. L., 2013), devido ao fato, entre outros, de ser o método padrão para o cálculo de evapotranspiração potencial pela FAO (ARROIO JUNIOR, 2016). O método *Penman-Monteith* leva em consideração o balanço energético e aerodinâmico, apresentado na Equação 4.

$$\lambda E = \frac{\Delta(H_{net} - G) + \rho_{ar} * c_p [e_z^0 - e_z]/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (2)$$

Em que, λE é a densidade do fluxo de calor latente ($MJ m^2 d^{-1}$), E é a taxa de evaporação profunda ($mm d^{-1}$), Δ é a rampa da curva pressão-temperatura do vapor de saturação, de/dT ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$), H_{net} é a radiação líquida ($MJ m^2 d^{-1}$), G é a densidade do fluxo de calor à superfície ($MJ m^2 d^{-1}$), ρ_{ar} é a densidade do ar ($kg m^{-3}$), c_p é o calor específico à pressão constante ($MJ kg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$), e_z^0 é a pressão do vapor de saturação do ar à altura z (kPa), e_z é a pressão do vapor de água do ar à altura z (kPa), γ é a constante psicrométrica ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$), r_c é a resistência do dossel vegetativo (sm^{-1}), r_a é a resistência de difusão da camada de ar (sm^{-1}).

Para estimar o escoamento superficial, o SWAT disponibiliza o método *Green Ampt* ou o *Curve Number Procedure – Soil Conservation Service (SCS)*. O método *Green Ampt* requer dados de precipitação sub-diários, o que inviabiliza sua utilização diante da ausência dessa informação. Desse modo, evidencia-se, na literatura, a ampla utilização do método curva número para as estimativas dos volumes de escoamento superficial (ARROIO JUNIOR, 2016), que é dado pela Equação 5.

$$Q_{sup} = \frac{(R_{dia} - I_a)}{(R_{dia} - I_a + S)} \quad (3)$$

Em que: Q_{sup} é o escoamento superficial acumulado em mm ; R_{dia} a chuva em um dia (mm); I_a parâmetro abstrato que inclui o armazenamento superficial, interceptação, infiltração e escoamento; e S é a retenção de água no solo (mm). A retenção de água no solo, por sua vez, varia espacialmente em função das alterações no uso e tipo, uso e manejo do solo, declividade da encosta e devido às mudanças temporais na retenção de água no solo, definido pela Equação 6.

$$S = 254 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4)$$

Na qual o CN é a curva número para um dia.

O detalhamento dos cálculos do modelo SWAT pode ser conferido, entre outros, nos estudos de Neitsh et al. (2011) e Srinivasan, Arnold e Jones (1998).

No que se refere a avaliação dos resultados do modelo, o SWAT oferece uma gama de variáveis de saída em nível de HRU e sub-bacias. Ainda permite que o usuário escolha saídas específicas relacionadas ao movimento da água nas vertentes, operações de manejo, sedimentos, entre outros. As principais variáveis relacionadas aos componentes do balanço hídrico, modeladas pelo SWAT são apresentadas no Quadro 2 e Quadro 3.

Quadro 2: Parâmetros do output global da bacia.

VARIÁVEIS	DESCRIÇÃO
SURFACE RUNOFF	Escoamento superficial gerado (mm)
LATERAL SOIL	Contribuição do fluxo lateral para vazão (mm)
GROUNDWATER (SHAL AQ)	Contribuição da água subterrânea para a vazão (mm). Fluxo de base
REVAP	Quantidade de água passando do aquífero raso para zona insaturada (mm)
DEEP AQ RECHARGE	Recarga do aquífero profundo (mm)
TOTAL AQ RECHARGE	Quantidade total de água que entra nos aquíferos rasos e profundos (mm)
TOTAL WATER YLD	Rendimento da água para vazão (mm)
PERCOALTION OUT OF SOIL	Percolação de água no fundo do perfil do solo na bacia hidrográfica para simulação (mm)
ET	Evapotranspiração real (mm)
PET	Evapotranspiração potencial (mm)
TRANSMISSION LOSSES	Quantidade média de perdas de transmissão do canal (mm)

Fonte: Adaptado de Neitsh et al. (2011).

Quadro 3: Parâmetros de output por sub-bacias.

VARIÁVEIS	DESCRIÇÃO
PET	Evapotranspiração potencial da sub-bacia (mm)
ET	Evapotranspiração real da sub-bacia (mm)
SW	Quantidade de água no perfil do solo (mm)
PERC ¹	Água que percorre a zona da raiz (mm)
SURQ	Contribuição do escoamento superficial para vazão (mm)
GW_Q	Contribuição da água subterrânea para vazão (mm). Fluxo de base
WYLD	Rendimento da água (mm).

¹ Existe uma defasagem entre o tempo que a água sai do fundo da zona radicular e chega ao aquífero raso. Durante um longo período de tempo, esta variável deve ser igual à percolação da água subterrânea.

Fonte: Adaptado de Neitsh et al. (2011).

No modelo SWAT, a variável SURFACE RUNOFF corresponde ao escoamento superficial terrestre gerado na microbacia. Este processo ocorre sempre que a taxa de aplicação da precipitação à superfície do solo excede a taxa de infiltração. Fatores ambientais como intensidade das chuvas, permeabilidade do solo e práticas de manejo interferem na quantidade de água que escoará superficialmente contribuindo para o fluxo dos corpos d'água. Esta variável é de grande relevância por estar diretamente associada às vazões de cheias, determinação de vazão de projeto, dimensionamento e planejamento de obras hidráulicas, de drenagem urbana, construção de reservatórios, entre outros (TUCCI, 2005).

O LATERAL SOIL é definido pela contribuição do fluxo lateral para a vazão da bacia e corresponde ao escoamento subsuperficial. Esse fluxo se origina abaixo da superfície e acima da zona saturada, conforme a condutividade hidráulica nas camadas de superfície e uma camada impermeável ou de baixa permeabilidade em baixa profundidade (NEITSCH et al.,

2011b). Além de contribuir para o fluxo no canal, o escoamento subsuperficial pode ser considerado também um condutor de sedimentos.

As variáveis GROUNDWATER (SHAL AQ), DEEP AQ RECHARGE, TOTAL AQ RECHARGE e PERCOALTION OUT OF SOIL estão intimamente relacionadas nos processos simulados pelo SWAT. O modelo divide as águas subterrâneas em aquífero raso e profundo. Da recarga total dos aquíferos (TOTAL AQ RECHARGE), uma fração (RCHRG_DP) é transformada em recarga de aquífero profundo (DEEP AQ RECHARGE), que não é mais contabilizada no modelo e outra contribui para o fluxo de base que chega no canal (GROUNDWATER (SHAL AQ), fornecido pelo aquífero raso. A percolação que ultrapassa a zona de raízes (PERCOALTION OUT OF SOIL) funciona como fonte de abastecimento para os dois aquíferos (NEITSCH et al., 2011b). O fluxo de base é de grande importância para a disponibilidade hídrica em uma bacia, principalmente nos períodos de estiagem, pois é essa porção de água do subsolo que é lentamente descarregada para os corpos hídricos. Além disso, a água armazenada no aquífero raso pode reabastecer a umidade do solo em condições de estresse hídrico, ou ser diretamente absorvida pelas plantas de raízes mais profundas, processo esse representado pela variável REVAP.

O TOTAL WATER YLD se refere a toda água produzida nas HRUs e convertida em vazão. Esta variável consiste no somatório do escoamento superficial, escoamento lateral, fluxo de base, subtraídas as perdas de transmissão e abstrações de lagoas. Ou seja, representa toda a contribuição da água produzida na bacia para a disponibilidade hídrica no canal. As perdas de transmissão, embutidas no somatório (TRANSMISSION LOSSES), referem-se às perdas de escoamento da superfície, via lixiviação, até o leito do rio, que normalmente ocorrem em rios efêmeros ou intermitentes.

A variável de evapotranspiração potencial da bacia (PET) representa a taxa em que a evapotranspiração poderia ocorrer em extensa área uniformemente coberta por vegetação, com fornecimento ilimitado de água no solo. Por não ser expressivamente afetada por processos microclimáticos, o seu valor é constante e não varia em função do aumento da cobertura florestal nas simulações. Assim, a variável mais representativa é a evapotranspiração real (ET), que corresponde ao conjunto de todos os processos ocorridos na terra dos quais a água, presente ou próximo à superfície da terra, se torna vapor (NEITSCH et al., 2011b). Esta variável está relacionada à cobertura florestal, devido à interceptação e, em climas tropicais, pode representar até 70% da precipitação incidente em uma bacia.

As variáveis de saída por sub-bacia sintetizam os processos descritos anteriormente, reduzindo-os aos principais componentes do balanço hídrico na bacia (Quadro 3). Adicionalmente, é apresentada a variável da quantidade de água disponível no solo no final de período de tempo (SW). Esta variável, somada a evapotranspiração real, representa a quantidade de água disponível para o aproveitamento natural, pelas florestas, cultivos agrícolas e pastagens. Contudo, de acordo com Arroio Junior (2016), processos que se desenvolvem em intervalos curtos, como o SW e REVAP, não têm interesse direto ao balanço hídrico.

Estudos na literatura demonstram a ampla aplicação do modelo SWAT para simulação do impacto de mudanças de uso e ocupação do solo no ciclo hidrológico e sedimentológico (BERTANI, 2014; CHEN, Y. et al., 2016; LIN et al., 2015; LOPES, 2008; LOTZ; OPP; HE, 2017; MARCHIORO, 2008; NGUYEN et al., 2017; RODRIGUES, E. L., 2013; SAJKUMAR; REMYA, 2015). De forma mais específica, tem emergido como uma ferramenta capaz de prever serviços ecossistêmicos das florestas (KROEGER et al., 2017; SCHMALZ et al., 2016; YANG; ZHANG, 2016) e sistemas agroflorestais (MWANGI et al., 2016) devido a sua eficiência na simulação hidrológica. Tais estudos buscam avaliar, principalmente, a produção de água, regularização de vazões e efeitos sobre a qualidade dos corpos d'água, servindo, assim, como suporte para formulação de projetos, políticas e ações de gestores de recursos hídricos e ambientais (FRANCESCONI et al., 2016; RODRIGUES; GUPTA; MENDIONDO, 2014; VOGL et al., 2017).

No Brasil, o SWAT é frequentemente utilizado para fins acadêmicos, em estudos realizados em diferentes regiões do país, sobretudo, regiões sudeste e sul. Os resultados de aplicação, em grande medida, demonstram-se bons ou satisfatórios após a etapa de calibração. Entretanto, cabe destacar que o modelo apresenta limitações recorrentes em estudos realizados em bacias tropicais.

Em vasta revisão realizada por Arroio Junior (2016), aponta-se a dificuldade de obtenção dos dados de entrada requeridos pelo modelo nas séries de dados observados para as etapas de análise de calibração. A revisão também apresenta problemas no processamento e preparação dos dados para o *input* do modelo; complexidade na seleção e parametrização dos parâmetros para calibração; limitações de alguns algoritmos do modelo na representação de determinados processos hidrológicos nas bacias. Essas limitações, entre outras, foram objeto de estudo de diferentes trabalhos realizados para bacias hidrográficas do país (ARROIO JUNIOR, 2016; CAIADO, 2005; FUKUNAGA et al., 2015; PEREIRA et al., 2016; STRAUCH; VOLK, 2013).

Bressiani et al. (2017) revisaram estudos que utilizaram o modelo SWAT no Brasil. Dos 102 estudos brasileiros revisados pelos autores, entre 1999 e 2013, 65% deles apresentaram estatísticas NS de calibração e / ou validação. Deste total, 94% dos estudos obtiveram valores de NS superiores a 0,5, considerado satisfatório (MORIASI et al., 2007), enquanto que 90% dos valores mensais de NS foram classificados como "bom" e "muito bom" e, aproximadamente, 75% das estatísticas diárias da NS superiores a 0,5. Aponta-se na literatura estatísticas semelhantes para os valores mensais de vazões de NS relatados outros estudos brasileiros mais recentes.

Em estudo realizado Blainski et al. (2014) o realizaram uma simulação de cenários de uso da terra na microbacia Ribeirão Gustavo, Santa Catarina, também utilizando o modelo. Em seu estudo, foi possível identificar mudanças no regime hidrológico mensal, principalmente, nos valores extremos da curva de permanência. Pereira et al. (2016) também utilizaram o modelo SWAT para fazer a simulação hidrológica na bacia interestadual do rio Pomba (8.616 km²). Os autores obtiveram resultados com análises de precisão estatística ótima para o modelo, com boas estimativas dos componentes do balanço hídrico e das vazões diárias máximas,

médias e mínimas anuais. Foi apontado que o SWAT ainda precisa melhorar a representatividade de chuvas para simular consistentemente valores extremos de vazões.

Pimentel (2017) buscou avaliar o impacto da alteração do uso e ocupação do solo para a bacia do rio Jucu (2.220 km²), Espírito Santo, com aumento progressivo da cobertura florestal. O modelo foi calibrado e validado de forma satisfatória, com NS igual a 0,60 e 0,52, respectivamente. As alterações realizadas não tiveram impactos significativos sobre o regime de vazões, contudo, o trabalho apontou que o aumento da cobertura florestal próximo aos cursos d'água diminuem as vazões mínimas, enquanto o reflorestamento concentrado nas áreas mais altas aumenta.

Fukunaga et al. (2015) aplicaram o SWAT na bacia do rio Itapemirim (2.237 km²), Espírito Santo. Obtendo bom desempenho para os períodos de calibração de acordo com a classificação de Moriasi et al. (2007), com resultados de NS 0,75, NS(Log) 0,78, PBIAS igual a 11% e RSR a 0,50. O modelo apresentou bom desempenho, principalmente para a simulação das vazões mínimas. Sendo considerado útil para simulação de vazão em bacias tropicais com baixa disponibilidade de dados meteorológicos. Resultados semelhantes também foram encontrados em outros estudos realizados no Espírito Santo (BRITO, 2013) e em outras regiões do país (BACELLAR, 2005; RODRIGUES, E. L. et al., 2015; SANTOS, 2010; SOUZA, 2015).

3.4.1 Aplicação do modelo SWAT na simulação de cenários de SAFs

O SWAT é um modelo que produz bons resultados de avaliação de alterações do uso e ocupação do solo em regiões hidrográficas, por processar a simulação de cenários complexos com diferentes composições de tipos de solo, de uso e ocupação do solo e de práticas de manejo do solo (BERTANI, 2014; RODRIGUES, E. L., 2013; SILVA, 2010). Entretanto, a avaliação de impactos de sistemas agroflorestais sobre os processos hidrológicos utilizando este modelo ainda não está bem documentada na literatura (FRANCESCONI et al., 2016; MWANGI et al., 2016; ONG et al., 2014).

De acordo com Mwangi et al. (2016), em estudo realizado para a bacia hidrográfica do rio Mara (13.750km²), leste da África, na avaliação do impacto de SAFs, deve-se dar atenção especial aos parâmetros do modelo que regem a perda de água no sistema (percolação, fluxo de base, evapotranspiração). A seleção errada dos valores destes parâmetros pode levar a um balanço hídrico não realista, mesmo havendo um bom ajuste entre os resultados simulados e observados. Assim, o conhecimento das características da bacia hidrográfica também é importante na modelagem hidrológica, pois não há procedimento automático de calibração que possa substituir o conhecimento físico real. Além disso, segundo os autores, as variáveis que melhor representam os impactos das agroflorestas sobre os processos hidrológicos são aqueles relacionados, entre outros, à umidade do solo, ao escoamento superficial, à conservação do solo, ao tipo de cobertura, ao fluxo de base e à infiltração (MWANGI et al., 2016). Diante da diversidade de variáveis utilizadas para representar os processos hidrológicos nos modelos, compreender de que forma este conjunto de parâmetros são

significativos para indicar a condição hidrológica da bacia ainda é um aspecto relevante a ser considerado nos estudos.

O modelo SWAT apresenta limitações na representação dos cenários agroflorestais por possuir estrutura pouco flexível, permitindo apenas um tipo de planta ou cultivo por Unidade de Resposta Hidrológica (HRU). Assim, em representação de SAFs comuns, como, por exemplo, intercalação de árvores pouco distribuídas com diferentes culturas, demonstrou-se um desafio, indicando ser necessária maior manipulação dos dados de entrada do modelo (MWANGI et al., 2016). Contudo, o modelo possui funcionalidade que permite a divisão de uma tipologia existente na bacia, em porcentagens relativas de outras tipologias, podendo ser essa uma alternativa na representação de cenários de SAFs na composição das HRUs (FERRIGO, 2014). O fator escala também se demonstrou significativo na determinação da magnitude das mudanças hidrológicas, onde o impacto das agroflorestas foi maior em escala de pequenas bacias, do que comparado à bacia como um todo; constatação importante do ponto de vista do planejamento e gestão dos recursos hídricos e da paisagem.

Em estudo realizado por Ullrick e Volk (2009), o SWAT demonstrou ser bastante sensível às práticas de rotação de culturas, comum em sistemas agroflorestais. Em alguns casos demonstrou sensibilidade até para pequenas variações no manejo, atingindo resultados satisfatórios. Assim, a inclusão de práticas de manejo recorrentes em SAFs reais pode contribuir para a melhoria da representação desses sistemas no modelo.

Na avaliação de tais processos, embora o modelo SWAT apresente limitações nas representações de arranjos de sistemas agroflorestais, a sua utilização para estudos de avaliação dos impactos destes sistemas sobre os processos hidrológicos pode fornecer detalhes importantes nas respostas hidrológicas do modelo, podendo subsidiar a determinação da condição hidrológica de bacias hidrográficas (RODRIGUES; GUPTA; MENDIONDO, 2014; SCHMALZ et al., 2016; ULLRICH; VOLK, 2009).

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDO, M. T. V. N.; VALERI, S. V.; MARTINS, A. L. M. Sistemas Agroflorestais e Agricultura Familiar: Uma Parceria Interessante. **Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária**, 2009.

ALBUQUERQUE, A. W. et al. Manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas nas perdas de solo e água em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 136–141, 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662002000100024&lng=pt&tlng=pt>.

ALVES, F. V. **SAF's + 10 Sistemas Agroflorestais e Desenvolvimento Sustentável: 10 Anos de Pesquisa**. Brasília: Embrapa, 2014.

AMADOR, D. B.; VIANA, V. M. Sistemas agroflorestais para recuperação de fragmentos florestais. **Série Técnica IPEF**, v. 12, p. 105–110, 1998. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/stecnica/nr32/cap10.pdf>>.

ANDRADE, C. W. L. de et al. Modelagem hidrológica sob mudanças na cobertura vegetal de

uma bacia hidrográfica no Nordeste do Brasil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 02, n. 03, p. 239–248, 2017. Disponível em: <www.ufrpe.br/jeap%0Ahttp://dx.doi.org/10.24221/jeap.2.3.2017.1446.239-248>.

ANTONELI, V.; THOMAZ, E. L. Comparação de infiltração de água no solo mensurada em período seco e úmido , em diferentes usos da terra na bacia do arroio Boa Vista, Guamiranga , Paraná. **Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 5, n. 1808–0251, p. 301–317, 2009.

ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assesment Part I: Model development. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89, 1998.

ARROIO JUNIOR, P. P. PROCESSOS HIDROLÓGICOS DO MODELO COMPUTACIONAL SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL - SWAT. p. 180, 2016.

BACELLAR, L. de A. P. O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas. **Geo.br**, v. 1, p. 1–39, 2005.

BAKER, T. J.; MILLER, S. N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. **Journal of Hydrology**, v. 486, p. 100–111, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.041>>.

BAYER, D. M. **Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala**. 2014. 172 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/95694>>.

BENINI, S. M. **Infraestrutura verde como prática sustentável para subsidiar a elaboração de planos de drenagem urbana: Estudo de caso da cidade de Tupã/SP**. 2015. 220 f. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, 2015. Disponível em: <http://www2.fct.unesp.br/pos/geo/dis_teses/15/dr/sandra_benini.pdf>.

BERTANI, G. **Influência Da Expansão Agrícola No Escoamento Superficial E Na Produção De Sedimentos No Cerrado Do Meio Norte Do Mato Grosso**. 2014. 113 f. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2014.

BESERRA, P. S. **Avaliação Dos Efeitos Das Alterações Na Cobertura E Uso Do Solo Sobre O Regime De Vazões Via Modelagem Hidrológica**. 2016. 145 f. Universidade de Brasília, 2016.

BLAINSKI, É. et al. Uso de modelo hidrossedimentológico para simulação de cenários de uso da terra na microbacia Ribeirão Gustavo , Santa Catarina. **Rega**, v. 11, p. 21–32, 2014.

BRITO, E. Estimativa Da Produção De Sedimentos Da Bacia Do Rio Santa Maria Da Vitória – Espírito Santo Através Do Modelo Matemático Soil and Water Assessment Tool (Swat). **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.

CAIADO, M. A. MODELING FATE AND TRANSPORT OF NITROGEN AND PHOSPHORUS IN CROP FIELDS UNDER TROPICAL CONDITIONS MODELING FATE AND TRANSPORT OF NITROGEN AND PHOSPHORUS IN CROP FIELDS UNDER TROPICAL. 2005.

CARAM, R. D. O. Mudanças no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia do rio Piracicaba. p. 141, 2010.

CARVALHO, F. H. de. Uso Do Modelo Swat Na Estimativa Da Vazão E Da Produção De Sedimentos Em Bacia Agrícola Do Cerrado Brasileiro. p. 152, 2014.

CASTRO, K. B. Avaliação do modelo SWAT na simulação de vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada. **Dissertação**, 2013.

CECÍLIO, R. A.; PIMENTEL, S. M.; ZANETTI, S. S. Modeling the influence of forest cover on streamflows by different approaches. **Catena**, v. 178, n. October 2018, p. 49–58, 2019.

CHEN, J.; WU, Y. Advancing representation of hydrologic processes in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) through integration of the TOPographic MODEL (TOPMODEL) features. **Journal of Hydrology**, v. 420–421, p. 319–328, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.022>>.

CHEN, Y. et al. Hydrological responses of land use change from cotton (*Gossypium hirsutum* L.) to cellulosic bioenergy crops in the Southern High Plains of Texas, USA. **GCB Bioenergy**, v. 8, n. 5, p. 981–999, 2016. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/gcbb.12304>>.

CONCEIÇÃO, J. R. da. **Metodologia para identificação de áreas prioritárias para redução da erosão hídrica em bacias de mananciais de abastecimento público do Paraná: estudo de caso bacia do Passaúna**. p. 1–94, 2014.

DEVIA, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, v. 4, n. Icwrcoc, p. 1001–1007, 2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214241X15001273>>.

DURIGAN, G.; TOREZA, J. M. **Book of Abstracts [of the] VII World Conference on Ecological Restoration**. [S.l.]: Linking Science and Practice for a Better World, 2017. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13697130512331390481>>.

FAN, F. M. et al. Evaluation of upper Uruguay river basin (Brazil) operational flood forecasts. **Rbrh**, v. 22, n. 0, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2318-03312017000100238&lng=en&tlng=en>.

_____. Sobre o uso da persistência de previsões determinísticas de vazão para a tomada de decisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 218–228, 2016.

FAN, F. M.; RAMOS, M.-H.; COLLISCHONN, W. Sobre o uso de previsões hidrológicas probabilísticas para tomada de decisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 914–926, 2015.

FERNANDES, V.; RAUEN, W. B. Sustainability: An interdisciplinary field. *Journal of Social, Technological and Environmental Science*. **Journal of Social, Technological and Environmental Science**. v. 5, n. 3, p. 188–204, 2016. Disponível em: <<http://revistas.unievangelica.edu.br/index.php/fronteiras/article/view/2049>>.

FERRIGO, S. Manual SWAT-Portugues. 2014.

FRANCESCONI, W. et al. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services: A systematic review. **Journal of Hydrology**, v. 535, p. 625–636, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.034>>.

FUKUNAGA, D. C. et al. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **Catena**, 2015.

GASSMAN, P. W.; SADEGHI, A. M.; SRINIVASAN, R. Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. **Journal of Environment Quality**, v. 43, n. 1, p. 1, 2014.

GIGLIO, J. N.; KOBIYAMA, M. Interceptação da Chuva: Uma Revisão com Ênfase no Monitoramento em Florestas Brasileiras. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 297–317, 2013.

GIRI, S.; ARBAB, N. N.; LATHROP, R. G. Water security assessment of current and future scenarios through an integrated modeling framework in the Neshanic River Watershed. **Journal of Hydrology**, v. 563, n. November 2017, p. 1025–1041, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.046>>.

GLAVAN, M.; PINTAR, M.; URBANC, J. Spatial variation of crop rotations and their impacts on provisioning ecosystem services on the river Drava alluvial plain. **Sustainability of Water Quality and Ecology**, v. 5, p. 31–48, 2015.

GUERRA, S. C. S. **Universidade Federal Do Espírito Santo**. 2014. 104 f. Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.

HALLOUIN, T. et al. Challenges in Using Hydrology and Water Quality Models for Assessing Freshwater Ecosystem Services: A Review. **Geosciences**, v. 8, n. 45, p. 19, 2018.

HAVRYLENKO, S. B. et al. Assessment of the soil water content in the Pampas region using SWAT. **Catena**, v. 137, p. 298–309, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.001>>.

HAYATI, D.; RANJBAR, Z.; KARAMI, E. Measuring Agricultural Sustainability. **Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture**, v. 5, p. 73–100, 2011.

HERNÁNDEZ-MORCILLO, M. et al. Scanning agroforestry-based solutions for climate change mitigation and adaptation in Europe. **Environmental Science and Policy**, v. 80, n. November 2017, p. 44–52, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.013>>.

HERZOG, C. P.; ROSA, L. Z. Infraestrutura verde: sustentabilidade e resiliência para a paisagem urbana. **Revista LABVERDE**, n. 1, p. 92–115, 2010.

KAUFFELDT, A. et al. Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level. **Environmental Modelling and Software**, v. 75, p. 68–76, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.09.009>>.

KROEGER, T. et al. **Análise do Retorno do Investimento na Conservação de Bacias Hidrográficas: Referencial Teórico e estudo de caso do Projeto Produtor de Água do Rio Camboriú, Santa Catarina Brasil**. Santa Catarina: The Nature Conservancy, 2017.

KROLL, C. N.; CROTEAU, K. E.; VOGEL, R. M. Hypothesis tests for hydrologic alteration. **Journal of Hydrology**, v. 530, p. 117–126, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.057>>.

LAURANCE, W. F. et al. An Amazonian rainforest and its fragments as a laboratory of global change. **Biological Reviews**, v. 93, n. 1, p. 223–247, 2017.

LELIS, T. A. Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, zona da mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT. p. 164, 2011.

LIN, B. et al. Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model. **Ecological Indicators**, v. 58, p. 55–63, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.031>>.

LOPES, N. H. Y. **Análise da produção de água e sedimentos em microbacias**

experimentais com o modelo SWAT. Dissertacao, 2008.

LOTZ, T.; OPP, C.; HE, X. Factors of runoff generation in the Dongting Lake basin based on a SWAT model and implications of recent land cover change. **Quaternary International**, p. 1–9, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1040618216308448>>.

MARCHIORO, E. Modelagem hidrosedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: Subsídios à Aplicação de Práticas de Conservação de Água e Solo no Noroeste Fluminense Modelagem hidrosedimentológica na bacia do córrego Santa Maria : Subsídios à Aplicação de Práticas de C. 2008.

MEDRADO, M. J. S. Sistemas Agroflorestais: aspectos básicos e indicações. p. 269–312, 2000.

MICCOLIS, A. et al. **Restauração ecológica com Sistemas Agroflorestais: Como conciliar conservação com produção. Opções para Cerrado e Caatinga.** [S.l: s.n.], 2016. Disponível em: <<http://www.worldagroforestry.org/downloads/Publications/PDFS/MN17387.pdf>>.

MONTALVÃO, M. T. L. **Modelagem dos Serviços Hidroambientais Resultantes de Práticas Conservacionistas na bacia do Córrego Taquarta - DF.** 2016. 68 f. Universidade de Brasília, 2016.

MORAES, M. A. (org). **Restauração de paisagens e florestas no Brasil.** Brasília: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN), 2016.

MORIASI, D. N. et al. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MWANGI, H. M. et al. Modelling the impact of agroforestry on hydrology of Mara River Basin in East Africa. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 18, p. 3139–3155, 2016.

NEITSCH, S. . et al. Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. **Texas Water Resources Institute**, p. 1–647, 2011a.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil & Water Assessment Tool (SWAT).** [S.l: s.n.], 2011b. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/documentation/>>.

NGUYEN, H. H. et al. Modelling the impacts of altered management practices, land use and climate changes on the water quality of the Millbrook catchment-reservoir system in South Australia. **Journal of Environmental Management**, v. 202, p. 1–11, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.014>>.

NOGUEIRA, M. L.; AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. Estudo da Dinâmica de Percolação da água no solo - Gouveia, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, 2012. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/260>>.

OLIVEIRA, F. P. de et al. Fatores relacionados à suscetibilidade da erosão em entressulcos sob condições de uso e manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 4, p. 337–346, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662012000400002&lng=pt&tlng=pt>.

ONG, C. et al. Agroforestry: Hydrological Impacts. **Encyclopedia of Agriculture and Food Systems**, p. 244–252, 2014. Disponível em:

<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444525123000280>>.

ÖZTÜRK, M.; COPTY, N. K.; SAYSEL, A. K. Modeling the impact of land use change on the hydrology of a rural watershed. **Journal of Hydrology**, v. 497, p. 97–109, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.022>>.

PARRON, L. M. et al. **Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília: [s.n.], 2015.

PAZ, A. R. et al. Análise de Sensibilidade da evapotranspiração anual calculada pelo modelo hidrológico MGB-IPH relativa ao parâmetro capacidade de armazenamento do solo. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - ABRH**, n. 19, p. 1–8, 2013.

PEREIRA, D. dos R. et al. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 7, p. 14–37, 2016.

PONTES, Paulo R M et al. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 888–904, 2015.

PONTES, Paulo Rógenes Monteiro et al. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling and Software**, v. 94, p. 1–20, 2017.

RIBASKI, J.; MONTOYA, L. J.; RODIGHERI, H. R. Sistemas agroflorestais: aspectos ambientais e socioeconômicos. **Informe Agropecuário**, v. 22, n. 212, p. 61–67, 2001.

RODRIGUES, D.; GUPTA, H.; MENDIONDO, E. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security. p. 7187–7205, 2014.

RODRIGUES, E. L. et al. Aplicação do modelo SWAT na avaliação do consumo de água em áreas de florestas plantadas na bacia do rio Pará, Alto São Francisco, em Minas Gerais. **Sociedade & Natureza**, v. 27, n. 3, p. 485–500, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-45132015000300485&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>.

_____. **Avaliação da produção de água (vazão), em função de alterações do uso e da implantação de florestas de eucalipto em larga escala na bacia do rio Pará - Alto São Francisco**. 2013. 102 f. Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S.; ISERNHAGEN, I. **Pacto pela restauração da mata atlântica : referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. São Paulo: LERF/ESALQ: Instituto Bioatlântica, 2009.

RUHOFF, A. L. et al. Validation of the global evapotranspiration algorithm (MOD 16) in two contrasting tropical land cover types. **Remote Sensing and Hydrology**, v. 352, n. December 2012, p. 128–131, 2012.

SAJKUMAR, N.; REMYA, R. S. Impact of land cover and land use change on runoff characteristics. **Journal of Environmental Management**, v. 161, p. 460–468, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.12.041>>.

SANTOS, R. de O. Avaliação da produção de sedimento na bacia hidrográfica do rio Potengi através do modelo SWAT. p. 187, 2010. Disponível em: <<http://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/15968>>.

SARI, V.; PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. Interceptação da chuva em diferentes

formações florestais na região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, p. 65–79, 2016.

SCHMALZ, B. et al. Water-related ecosystem services in Western Siberian lowland basins—Analysing and mapping spatial and seasonal effects on regulating services based on ecohydrological modelling results. **Ecological Indicators**, v. 71, p. 55–65, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.050>>.

SEIBERT, J.; MCDONNELL, J. J. Land-cover impacts on streamflow: a change-detection modelling approach that incorporates parameter uncertainty. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, n. 3, p. 316–332, 2010. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02626661003683264>>.

SILVA, L. R. S. **Análise de Incertezas e Avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de Bacias Hidrográficas**. 2010. 241 f. Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

SOUZA, K. B. DE. **Influência Do Uso E Ocupação Do Solo Na Vazão Da Bacia Do Rio Uruçuí-Preto, Piauí**. 2015. 80 f. Universidade Federal do Piauí, Bom Jesus, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/123456789/239>>.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G.; JONES, C. A. Hydrologic modelling of the United States with the Soil and Water Assessment Tool. **International Journal of Water Resources Development**, v. 14, n. 3, p. 315–325, 1998.

STRAUCH, M.; VOLK, M. SWAT plant growth modification for improved modeling of perennial vegetation in the tropics. **Ecological Modelling**, 2013.

TÔSO, S. G. et al. A utilização do MIMES – Multi-Escale Integrated Model of the Earth Systems Ecological Services como ferramenta importante para valoração de Serviços Ecosistêmicos. 2008.

TUCCI, C. E. M. Gestão de Inundações Urbanas. **Ministério das Cidades, Global Water Partnership, World Bank, Unesco**, p. 269, 2005.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto Das Mudanças Da Cobertura Vegetal No Escoamento: Revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, p. 135–152, 1997. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/scholar?q=autor%3ATUCCI+bacia+hidrogr%C3%A1fica&btnG=&hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&as_ylo=1997&as_yhi=1997#0>.

ULLRICH, A.; VOLK, M. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 8, p. 1207–1217, 2009.

VILLA, F. et al. ARIES (ARTificial Intelligence for Ecosystem Services): a new tool for ecosystem services assessment , planning , and valuation. **Aries**, p. 1–10, 2009.

VOGL, A. L. et al. Valuing investments in sustainable land management in the Upper Tana River basin, Kenya. **Journal of Environmental Management**, v. 195, p. 78–91, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.013>>.

YANG, Q.; ZHANG, X. Improving SWAT for simulating water and carbon fluxes of forest ecosystems. **Science of the Total Environment**, v. 569–570, p. 1478–1488, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.238>>.

4 ARTIGO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS SOBRE A CONDIÇÃO HIDROLÓGICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

RESUMO

Existe uma carência de estudos que investiguem e quantifiquem os impactos de sistemas agroflorestais sobre componentes do ciclo hidrológico das bacias hidrográficas. O objetivo desse trabalho foi avaliar a influência de SAFs sobre a condição hidrológica de bacias hidrográficas por meio de indicadores obtidos a partir de variáveis do modelo SWAT. O estudo mostrou maior influência dos SAFs sobre a dinâmica subterrânea, com aumento da recarga de aquíferos rasos e profundos, bem como aumento da contribuição do fluxo de base para as vazões, para cenários de adoção de até 42% de SAFs. A contribuição do escoamento superficial para as vazões reduziu em até 22% com o aumento da área de adoção de SAFs. Portanto, o aumento da cobertura de SAFs influenciou na condição hidrológica, sobretudo na dinâmica das águas subterrâneas e escoamento superficial. Além disso, o modelo SWAT se mostrou uma ferramenta capaz de auxiliar na avaliação dos efeitos da adoção de SAFs com vistas à provisão de serviços ecossistêmicos, contribuindo para maior conhecimento acerca dos benefícios hidrológicos associados a estes sistemas, com potenciais subsídios às políticas de incentivo de aumento da cobertura florestal.

Palavras-chave: Sistemas Agroflorestais, ciclo hidrológico, SWAT, recursos hídricos.

ABSTRACT

There is a lack of studies that investigating and quantifying the impacts of agroforestry systems on the components of the hydrological cycle of river basins. The purpose of this work was evaluating the influence of agroforestry systems (SAF) on the hydrological condition of hydrographic basins, through indicators obtained from variables of the SWAT model. The study showed a greater influence of the SAFs on the underground dynamics, with increased recharge of shallow and deep aquifers, as well as increased contribution of the base flow to the river for scenarios in which 42% of the basin was covered with SAFs. The contribution of surface runoff to flow rates reduced up to 22% with the increase in the area where SAFs was adopted. Therefore, the increased SAFs' coverage had an influence on the hydrological condition, especially on groundwater dynamics and surface runoff. In addition, the SWAT model proved to be a tool capable of assisting in the evaluation of the effects of adopting SAFs for the provision of ecosystem services, contributing to greater knowledge about the hydrological benefits associated with these systems, with potential subsidies to the policies to increase the forest cover.

Keys-words: agroforestry systems, hydrological cycle, water resources. **Keys-words:** agroforestry systems, hydrological cycle, water resources.

4.1 INTRODUÇÃO

As alterações da cobertura florestal associada à ausência ou ao manejo inadequado dos sistemas florestais podem causar impactos (positivos e/ou negativos) em vários componentes do ciclo hidrológico natural, tais como evapotranspiração, infiltração da água no solo e escoamento superficial (BAYER, 2014; BENINI, 2015; LOPES, 2008; ÖZTÜRK; COPTY; SAYSEL, 2013; SAJIKUMAR; REMYA, 2015). Historicamente, os processos de alteração do uso e ocupação do solo atuam amplamente no sentido de redução da cobertura florestal, dando espaço às manchas urbanas, extensas áreas de pastagens, entre outros usos menos sustentáveis do solo, que causam impactos sobre a quantidade e qualidade dos recursos hídricos. Outro fator que implica na redução da cobertura florestal é o potencial de fertilidade dos solos sob as florestas, que faz com que estas sejam alvo de conversão em terras agrícolas em diversas regiões no mundo (MWANGI et al., 2016).

Assim, a restauração florestal tem sido objeto de diferentes projetos e políticas no Brasil (FERNANDES; RAUEN, 2016; MORAES, 2016) e no mundo (GIRI; ARBAB; LATHROP, 2018; HERNÁNDEZ-MORCILLO et al., 2018). E, neste contexto, as agroflorestas se constituem em solução prática para o aumento da cobertura florestal em áreas já desmatadas, degradadas e de agricultura consolidada, principalmente, por comunidades que dependem do cultivo agrícola. De acordo com Bene e Beall (1977 *apud* MICCOLIS et al., 2016), sistemas agroflorestais (SAFs) consistem no “manejo sustentável da terra que busca aumentar a produção de forma geral, combinando culturas agrícolas com árvores e plantas da floresta e/ou animais, simultânea ou sequencialmente, e aplica práticas de gestão que são compatíveis com os padrões culturais da população local”. Em um SAF, cada espécie possui um estrato, que se refere à altura em relação às outras plantas e à necessidade de recebimento de luz na fase adulta, ou tolerância à sombra (RIBASKI; MONTOYA; RODIGHERI, 2001).

No âmbito da restauração florestal, os sistemas agroflorestais podem fornecer uma série de serviços ecossistêmicos associados à cobertura florestal natural, como o controle de erosão, o aumento da fertilidade do solo, a promoção da biodiversidade e a ciclagem de nutrientes (GUERRA, 2014; HAYATI; RANJBAR; KARAMI, 2011; MWANGI et al., 2016; ONG et al., 2014). Do ponto de vista hidrológico, florestas/agroflorestas são ainda capazes de atenuar as vazões de cheias nos rios, contribuir para o fluxo de base – principalmente nos períodos de estiagem (ONG et al., 2014; TUCCI; CLARKE, 1997; VOGL et al., 2017) e melhorar a qualidade das águas, reduzindo o aporte de sedimentos.

Outros benefícios podem não ser percebidos quando se avalia os impactos dos SAFs sobre a disponibilidade hídrica por meio dos regimes de vazões. Esse tipo de cobertura vegetal absorve maior radiação que outras, atenuando as temperaturas e aumentando a umidade do ar e do solo (HERNÁNDEZ-MORCILLO et al., 2018; LOPES, 2008; ONG et al., 2014; TUCCI; CLARKE, 1997). Além disso, atuam diretamente na interceptação da água da chuva (GIGLIO e KOBİYAMA, 2013), permitindo também maior infiltração da água no solo, com potencial aumento de recarga de aquíferos rasos e profundos (BERTANI, 2014; GIGLIO; KOBİYAMA, 2013; NOGUEIRA; AUGUSTIN; ARANHA, 2012; SAJIKUMAR; REMYA, 2015; SOUZA, 2015).

Por esses motivos, a adoção de sistemas agroflorestais é incentivada em diferentes países, sendo aplicados, por exemplo, em projetos e programas de incentivo à restauração das paisagens (DURIGAN; TOREZA, 2017; SOSSAI et al., 2016), enfrentamento e mitigação de impactos de mudanças climáticas (HERNÁNDEZ-MORCILLO et al., 2018) e desenvolvimento sustentável (FRANCESCONI et al., 2016; VOGL et al., 2016). O Novo Código Florestal (Lei 12.651/2012), no Brasil, permite que estes sistemas sejam incluídos em metas de programas que realizam Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) para finalidades ecossistêmicas, como é o caso do Programa Reflorestar, no Espírito Santo (SEAMA-ES, 2017).

Na última década, no estado do Espírito Santo, foram elaborados diversos projetos com foco na restauração das paisagens florestais. Atualmente, o Programa Reflorestar/ES, coordenado pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo (SEAMA), atua nesta perspectiva e busca contribuir para a restauração do ciclo hidrológico de bacias hidrográficas por meio do Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). As ações desse Programa são dedicadas à conservação da mata nativa, à recuperação, reflorestamento e arranjos florestais que conciliam a prestação de serviços ecossistêmicos com a geração de renda para o produtor rural – sistemas agroflorestais (SOSSAI et al., 2016).

A adoção de SAFs possui potencial de interferência sobre a condição hidrológica das bacias hidrográficas. No entanto, a direção e a magnitude da mudança nos diferentes componentes do balanço hídrico podem diferir tanto nas características físicas e climatológicas das bacias hidrográficas, como na proporção da bacia hidrográfica sob a cobertura florestal, levando em conta as espécies de árvores produtivas, disposição espacial e o trato dado a estes sistemas (MWANGI et al., 2016). Portanto, compreender como e o quanto as práticas agroflorestais afetarão esses processos é também importante para uma gestão dos recursos hídricos e de paisagens mais adequadas.

A modelagem hidrológica constitui-se numa importante ferramenta utilizada para compreender e representar os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica. Além de serem adaptáveis às pequenas, médias e grandes bacias, onde o estudo com bacias experimentais não é factível (BAYER, 2014), os modelos são capazes de envolver uma diversidade de aspectos (grande variabilidade de classes de solo e de uso e cobertura florestal, ações antrópicas, práticas de manejo) na composição dos dados (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015; SEIBERT; MCDONNELL, 2010), possibilitando também a previsão de condições diferentes das observadas por meio da utilização de cenários de simulação (TUCCI, 1998).

Sob a ótica do planejamento territorial, alguns modelos são frequentemente utilizados para quantificar os serviços ecossistêmicos das florestas e arranjos florestais, bem como subsidiar os processos de tomada de decisão dos gestores e formulação de políticas ambientais, tais como o modelo *Multi-scale Integrated Model of Ecosystem Services* - MIMES (TÔSO et al., 2008), o *Artificial Intelligence for Ecosystem Services* - ARIES (VILLA et al., 2009), o *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs* - InVEST (SILVA et al., 2015; CONCEIÇÃO, 2014; TALLIS, 2011). Entretanto, estes modelos apresentam limitações de

simplificação dos ciclos e processos naturais, não permitindo, por vezes, aprofundar no detalhamento dos resultados das variáveis hidrológicas.

Outros modelos mais específicos têm sido frequentemente utilizados para avaliar os impactos da alteração do uso e ocupação do solo/cobertura florestal sobre os processos hidrológicos, principalmente o impacto sobre o regime de vazões. Dentre eles podemos destacar a utilização do *Soil and Water Assessment Tool* - SWAT (BERTANI, 2014; LOPES, 2008; LOTZ; OPP; HE, 2017; MARCHIORO, 2008; NGUYEN et al., 2017; RODRIGUES, E. L., 2013; SAJIKUMAR; REMYA, 2015), *Systeme Hydrologique European* - MIKE-SHE model (ÖZTÜRK; COPTY; SAYSEL, 2013), *Hydrologiska Bryans Vattenavdelning model* - HBV model (SEIBERT; MCDONNELL, 2010), TOPMODEL (CHEN, J.; WU, 2012), *Variable Infiltration Capacity model* - VIC model (KAUFFELDT et al., 2016) e Modelo de Grandes Bacias - MGB-IPH (BAYER, 2014; BESERRA, 2016; CARAM, 2010; PAZ et al., 2013; RUHOFF et al., 2012).

Além dessas aplicações, a utilização do modelo SWAT é crescente para a avaliação de serviços ecossistêmicos relacionados à disponibilidade hídrica. Deste modo, Deve-se considerar, que a sua utilização para estudos de avaliação dos impactos desses sistemas sobre os processos hidrológicos pode fornecer detalhes importantes sobre as respostas hidrológicas do modelo, podendo subsidiar a determinação da condição hidrológica de bacias hidrográficas (FRANCESCONI et al., 2016; SCHMALZ et al., 2016; ULLRICH; VOLK, 2009).

Diante dessas avaliações, a importante adoção de sistemas agroflorestais com vistas aos serviços ecossistêmicos, principalmente no que tange a impactos sobre os recursos hídricos, faz com que o aumento de cobertura florestal por estes sistemas seja incentivado por diferentes políticas ambientais no mundo. Entretanto, compreendendo a importância das ações de reflorestamento para o ciclo hidrológico natural, percebeu-se, por um lado, uma carência de estudos específicos que indiquem os impactos das ações do Programa sobre a disponibilidade hídrica das bacias de atuação e, por outro, a necessidade de difusão do conhecimento e percepção dos benefícios associados a estes sistemas para que a restauração das paisagens florestais seja difundida no território. Levando em conta essas observações, compreender os impactos de sistemas agroflorestais sobre a condição hidrológica é importante para o aperfeiçoamento da avaliação de desempenho de programas, como o Reflorestar/ES, como suporte às tomadas de decisões com rebatimento sobre a gestão dos recursos hídricos.

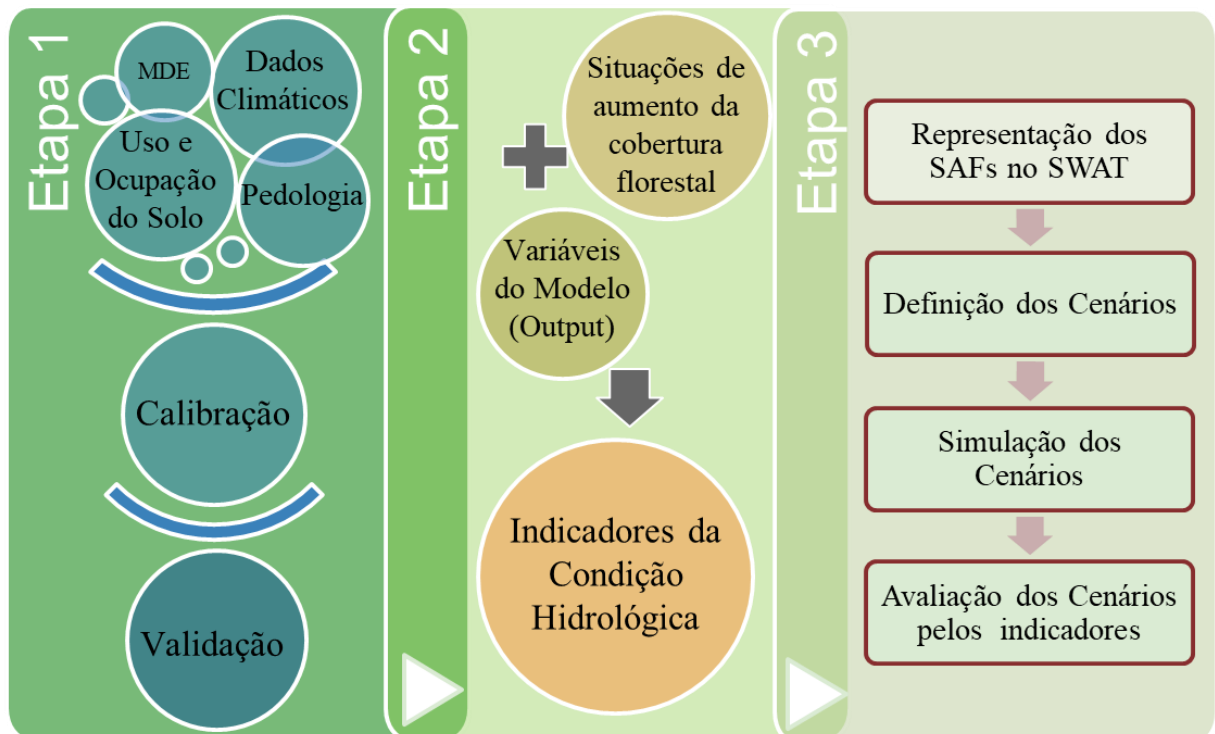
Neste contexto, o presente trabalho busca avaliar a influência de SAFs sobre a condição hidrológica de bacias hidrográficas, por meio de indicadores obtidos a partir de variáveis do modelo SWAT, com vistas a ampliar o conhecimento acerca da adoção desses sistemas sobre a disponibilidade hídrica.

4.2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada no desenvolvimento deste estudo, ilustrada na Figura 7, foi aplicada à região hidrográfica do Córrego do Galo (RHCG), situada na bacia hidrográfica do rio Jucu / Espírito Santo. São três as etapas metodológicas utilizadas nesse estudo: 1) foram realizados

os passos preliminares de coleta e preparação da base de dados requeridos pelo modelo SWAT, além de realizados processos de calibração e validação do modelo, que serviram de base para as etapas subsequentes; 2) foi verificado como melhor representar a condição hidrológica em uma região. Com esse intuito, foram avaliadas as variáveis de saída do SWAT e comparados cenários de aumento da cobertura florestal, a fim de definir quais variáveis poderiam ser utilizadas como indicadores da condição hidrológica; 3) a forma de representação dos SAFs foi adequada no modelo a fim de melhor reproduzir configuração real dos sistemas. Em seguida foram definidos e simulados cenários de: a) aumento da cobertura florestal de SAFs; e b) diferentes arranjos dos SAFs, com base nas tipologias vegetais existentes na área de estudo e os arranjos comumente utilizados pelo Programa Reflorestar. Por fim, os cenários foram avaliados com o auxílio dos indicadores da condição hidrológica, pré-definidos na etapa anterior.

Figura 7: Fluxograma geral metodológico.



Fonte: Autoria própria.

4.2.1 Caracterização da Área de Estudo

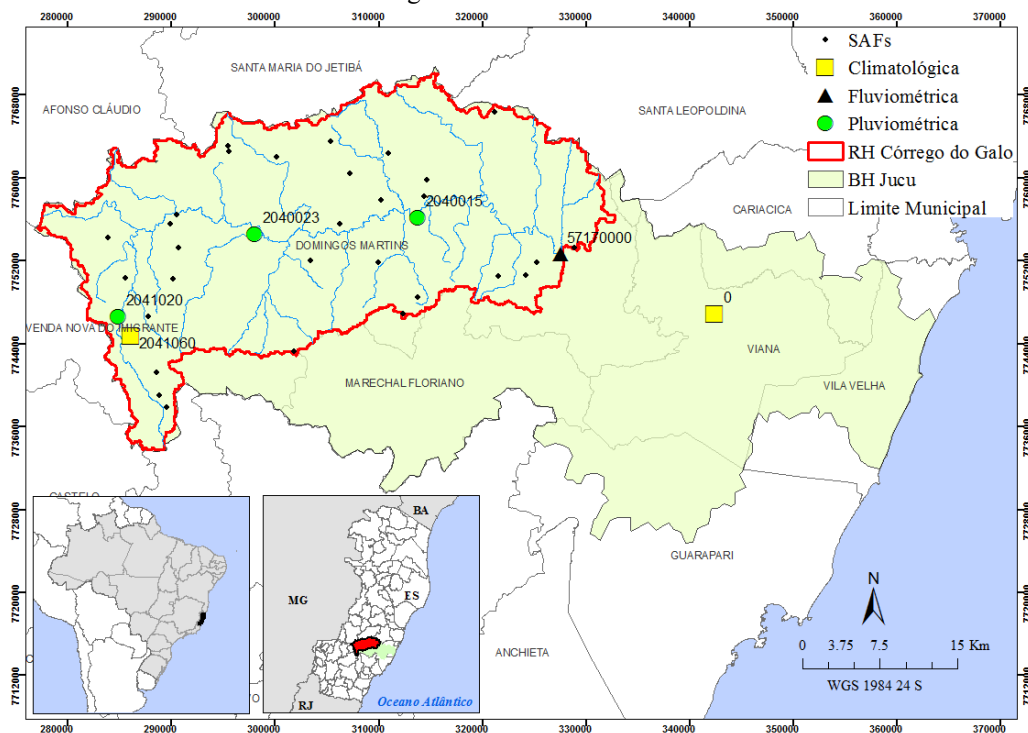
A área de estudo, RHCG, corresponde às regiões alta e média da bacia hidrográfica do rio Jucu, principal fonte de abastecimento da Região Metropolitana da Grande Vitória. A bacia está situada na região Sudeste do Brasil e Centro-Sul do Espírito Santo, possuindo área de drenagem de, aproximadamente, 991 km², a qual compreende, quase completamente, ao município de Domingos Martins, conforme apresentado na Figura 8.

Os principais problemas ambientais da RHCG são a poluição do rio e seus afluentes pelo lançamento de efluentes sanitários e lançamento de cargas difusas oriundas da atividade agropecuária, agravados com situações de eventos críticos, degradação do solo e perda de

biodiversidade (CONSÓRCIO NIP & PROFIL, 2016). Esses impactos também prejudicam a capacidade produtiva rural e o abastecimento público de água (SEAMA-ES, 2017). Assim, a área de estudo está inserida nas regiões estratégicas para reflorestamento do Programa Reflorestar e representa um espaço estratégico para subsidiar a cadeia produtiva de projetos de restauração das paisagens e florestas. Além disso, a RHCG foi escolhida por possuir ponto de monitoramento de vazão, permitindo que o modelo fosse calibrado, e por possuir tipologias de uso do solo compatíveis com os SAFs propostos na modelagem computacional.

A Figura 8 permite identificar a presença de algumas áreas com implantação de projetos de sistemas agroflorestais subsidiados pelo Reflorestar/ES. Esses projetos serviram como base para a definição dos arranjos agroflorestais utilizados na composição dos cenários simulados, que será melhor descrito no item 4.2.6.1.

Figura 8: Área de Estudo.



Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Dados Utilizados

Conforme apresentado na Figura 7, para o desenvolvimento da modelagem são necessários dados climatológicos, topográficos, pedológicos e de uso e ocupação do solo. Foram utilizados dados climáticos diários (precipitação, temperaturas máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa) coletados em estações meteorológicas monitoradas pelo Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER, 2016), no período de 1984 a 2015. Os dados diários de vazão e precipitação foram coletados em estação fluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA, 2016). Na Figura 8, pode-se observar a localização das estações pluviométricas, fluviométrica e climatológicas utilizadas no estudo. Informações mais detalhadas são apresentadas na Tabela

1. Verifica-se que a bacia de estudo (RHCG) possui apenas uma estação com dados de vazão, a qual está localizada no seu exutório. Esta estação será considerada para a calibração e validação do modelo, conforme apresentado em seção específica a seguir.

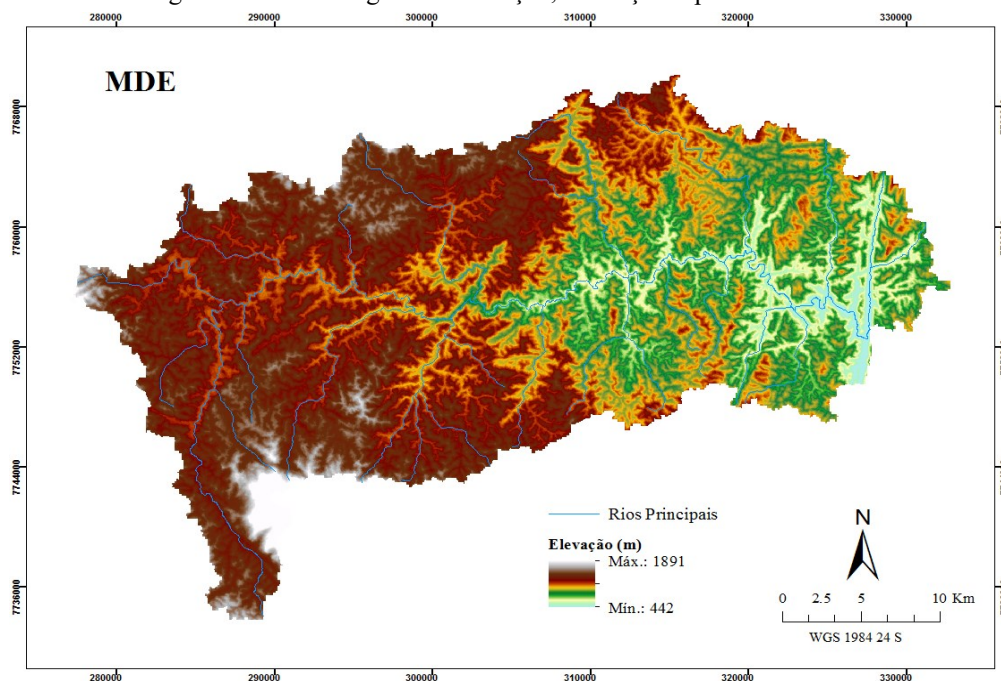
Tabela 1: Caracterização das estações climatológicas utilizadas.

CÓDIGO	ESTAÇÃO	DADO	RESPONSÁVEL	COORDENADAS	
				LAT.	LONG.
02041020	Arace	Precipitação	ANA	20,37 S	41,06 W
02040012	Marechal Floriano	Precipitação	ANA	20,38 S	41,42 W
02040015	Perobinha	Precipitação	ANA	20,28 S	40,78 W
57170000	Córrego do Galo	Vazão	ANA	20,32 S	40,65 W
-	Domingos Martins	Precipitação, temperatura, velocidade do vento, radiação solar, umidade relativa	INCAPER	20,38 S	41,05 W
-	Viana	Precipitação, temperatura, umidade relativa	INCAPER	20,37 S	40,51 W

Fonte: Autoria própria.

Os dados topográficos foram obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação do terreno (MDE) (Figura 9), Mosaico TM LANDSAT 2010, com resolução espacial de 30 metros, obtido no sitio do Instituto Jones do Santos Neves (IJSN, 2011).

Figura 9: Modelo Digital de Elevação, resolução espacial 30 metros.

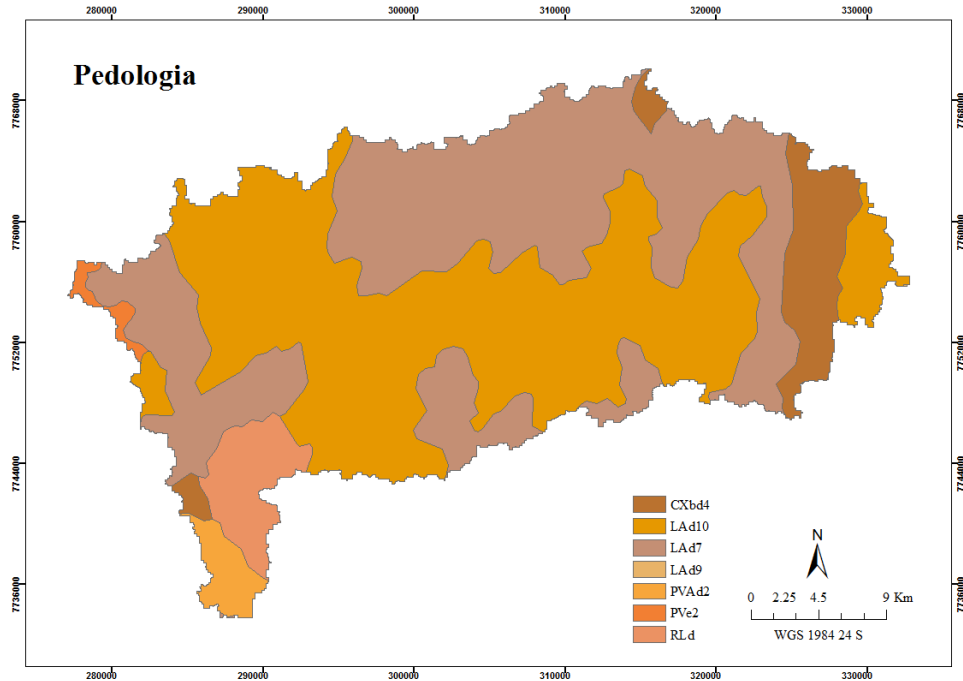


Fonte: Autoria própria.

As informações pedológicas da bacia hidrográfica foram oriundas de uma base de dados de escala 1:400.000, em levantamento realizado pela EMBRAPA, em 1978, para todo o estado do Espírito Santo (Figura 10). Considerando que o modelo SWAT opera com base de dados pedológicos dos Estados Unidos, foram inseridos os tipos de solo correspondentes à bacia do

rio Jucu, com suas características pedológicas para os parâmetros relacionados à produção de água, adaptado de Moreira (2018).

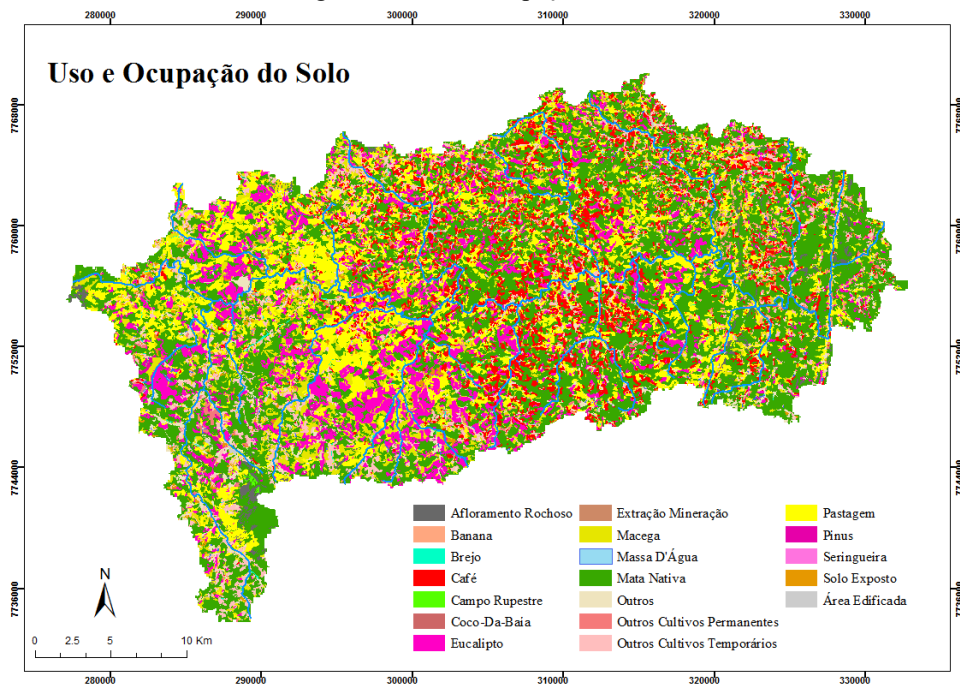
Figura 10: Pedologia, escala 1:400.000.



Fonte: Autoria própria.

Para a obtenção das informações de uso e ocupação do solo (Figura 11), foi utilizado o ortofotomosaico fornecido pelo IEMA (2012/2015): “Mapeamento da Cobertura Vegetal Nativa e do Uso das Terras”, em escala de 1:25.000, com tamanho de pixel 0,25x0,25m, abrangendo todo o território do Espírito Santo. Para a simulação dos cenários, realizou-se uma correspondência dos tipos de usos e ocupação da bacia com aqueles existentes no repositório do modelo SWAT, de modo que alguns parâmetros relacionados à vegetação foram adaptados para melhor corresponder as fisionomias brasileiras, conforme estudos realizados por Pereira et al. (2016), apresentado na Tabela 2.

Figura 11: Uso e Ocupação do Solo.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2: parâmetros da vegetação modificados no banco de dados do SWAT.

TIPOLOGIA DE USO	SWAT	PARÂMETROS		
		BLAI (índice de área foliar máximo) (m ² .m ⁻²)	GSI (Condutância estomática do dossel) (m.s ⁻¹)	OV N (nº Manning) (s.m ^{-1/3})
Floresta Nativa	FRSD	7,5	0,033	0,3
Eucalipto	EUCA	4,0	0,01	0,17
Pasto	PAST	3,0	0,010	0,23
Agricultura	AGRR	7,0	0,0095	0,14

Fonte: Pereira et al., 2016.

4.2.3 Modelagem Computacional

Neste estudo, foi empregado o modelo SWAT para simulação da vazão e dos componentes do balanço hídrico para a bacia de estudo. Embora o SWAT seja amplamente utilizado para avaliações de alterações de uso e ocupação do solo, o uso para avaliação da influência de SAFs ainda não é bem documentado na literatura (MWANGI et al., 2016). A primeira etapa do processo de modelagem com o SWAT consistiu na subdivisão da região hidrográfica de estudo em sub-bacias a partir do MDE. Foi estabelecido um limite de 2500 ha, como sendo a área acumulada de superfície da bacia a partir da qual se considera o início de um curso d'água, gerando, assim, uma rede de drenagem com 21 trechos e 21 sub-bacias. Cada sub-bacia foi ainda dividida em unidades menores denominadas Unidades de Resposta Hidrológica (HRU). Cada HRU possui uma combinação única de uso do solo, tipo de solo e declividade. Os critérios estabelecidos para a definição das HRUs foram os percentuais

mínimos de área coberta sobre a bacia, sendo: 1% (uso e ocupação do solo), 10% (solos) e 10% (declividade). Gerando-se, assim, 502 HRUs.

O conjunto de dados climáticos (precipitação, temperatura, radiação solar, umidade relativa e velocidade dos ventos) topográficos, pedológicos e de uso e ocupação do solo foram utilizados como entrada para simular os processos hidrológicos que ocorrem na bacia. Os componentes do balanço hídrico empregados no SWAT (fase terrestre) incluem a evapotranspiração, o escoamento superficial, a percolação, o escoamento subsuperficial (escoamento lateral) e o escoamento subterrâneo (escoamento de base). Para estimar a evapotranspiração potencial foi adotado o método de *Penman Montith*, em função dos dados climáticos disponíveis (NEITSCH et al., 2011). O balanço hídrico foi calculado, inicialmente, em nível de HRU e, posteriormente, acumulado em nível de sub-bacias. A propagação da vazão no canal foi realizada pelo método de propagação de *Muskingum*.

As simulações dos processos da fase terrestre são baseadas na equação de balanço hídrico (Equação 7).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (5)$$

Em que: W é o teor de água do solo, t é tempo em dias e R , Q , ET , P e QR são quantidades de precipitação diária, escoamento, evapotranspiração, percolação e fluxo de retorno, respectivamente. Todas as unidades são dadas em milímetros. O detalhamento dos cálculos do modelo SWAT pode ser conferido, entre outros, nos estudos de Neitsh et al. (2011) e Srinivasan, Arnold e Jones (1998).

Inicialmente, foi realizada uma simulação no SWAT para o período de 1989 a 2015, considerando os dois primeiros anos como aquecimento do modelo, para definir os períodos de calibração e validação e os parâmetros mais sensíveis para serem calibrados.

4.2.4 Calibração e Validação do Modelo

A calibração do modelo foi realizada de forma semi-automatizada pelo software SWAT-CUP, considerando os dados observados da estação fluviométrica da ANA, utilizando-se o algoritmo SUFI2 (*Sequential Uncertainty Fitting*). Mais informações sobre o funcionamento do modelo podem ser obtidas em Abbaspour et al. (2015). Foi considerado o período de 1991 a 2005 para calibração, com 2 anos para aquecimento do modelo, ou seja, não entraram nas estatísticas de avaliação.

Como resultado da análise de sensibilidade, os parâmetros calibrados são apresentados na Quadro 2. A calibração foi realizada conforme orientações fornecidas por Abbaspour et al. (2015), usando como referência para definição dos intervalos outros estudos realizados na bacia (CORREIA, 2016; PIMENTEL, 2017; MOREIRA; SCHWAMBACK; RIGO, 2018). Os parâmetros foram calibrados em escala mensal. Após a calibração automática, foi ainda realizado um ajuste manual nos valores de alguns parâmetros, a fim de se obter resultados

mais satisfatórios. Nesta etapa, buscou-se obter o melhor resultado possível das estatísticas de avaliação consideradas, classificando os resultados de acordo com Moriasi et al. (2007).

Quadro 4: Parâmetros de entrada do SWAT utilizados na calibração da RHCG

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO
CN2	Valor da curva número para condição de umidade II
SOLK	Condutividade hidráulica saturada [mm.h ⁻¹]
SLSUBBSN	Comprimento médio do declive [m]
GW _{DELAY}	Intervalo de tempo para recarga do aquífero raso [dias]
RCHRG _{DP}	Fração de percolação para o aquífero profundo [%]
ALPHA _{BF}	Fator alfa de recessão do fluxo de base [dias]
GWQMN	Profundidade limite de água no aquífero raso para ocorrer fluxo de base no canal [mm]

Fonte: Neitsch et al. (2011).

A validação foi realizada no ArcSWAT, no período de 2006 a 2012, com os valores dos parâmetros estabelecidos no período de calibração. O objetivo da validação foi avaliar se o modelo com os valores dos parâmetros definidos na fase de calibração conseguia representar o comportamento da bacia em um período diferente.

O desempenho do modelo na representação da dinâmica da água na bacia foi avaliado por meio de coeficientes estatísticos, comparando os valores simulados e os observados. Foram considerados o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), o coeficiente Nash do logaritmo das vazões (NSlog), o Viés Percentual Bias (PBIAS) e o erro padrão médio normalizado (RSR). A avaliação foi feita conforme a classificação adaptada de Moriasi et. al (2007) (Tabela 3).

- NS: verifica o ajuste das vazões máximas, varia de $-\infty$ até 1, sendo NS igual a 1 uma simulação perfeita do modelo. Por outro lado, NS igual a zero indica que os valores simulados são iguais às médias dos valores medidos; e NSE negativo demonstra uma simulação inadequada (Equação 8).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E})^2} \quad (6)$$

- NSlog: varia conforme o NS, contudo é utilizado para verificar o ajuste do fluxo de base (Equação 9).

$$NSlog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(E_m) - \log(E_s))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(E_m) - \bar{E})^2} \quad (7)$$

- PBIAS: calcula a tendência de a média dos dados simulados ser maior ou menor que os dados observados (Equação 10). Valores negativos indicam que a variável simulada está sendo superestimada e valores positivos indicam subestimação.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s) * 100}{\sum_{i=1}^n (E_m)} \quad (8)$$

- $RSR = RMSE/STDEV$: raiz do erro quadrático médio, mais sensível para vazão máxima, pode variar a partir de 0, onde o valor nulo indica ausência de variação residual, até um valor positivo, indicativo do oposto (Equação 11).

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E})^2}} \quad (9)$$

Nas equações: E_m = evento monitorado; E_s = evento simulado; \bar{E} = média dos eventos monitorados; e n = número de eventos.

Embora não exista um padrão formal de avaliação de desempenho das estatísticas de precisão obtidas com simulações do SWAT, foi adotada uma classificação proposta por Moriasi et al. (2007), conforme Tabela 3.

Tabela 3: Classificação das estatísticas de avaliação de desempenho do modelo.

CLASSIFICAÇÃO	NS	NSlog	PBIAS	RSR
MUITO BOM	$0,75 < NS \leq 1,00$	$0,75 < NSlog \leq 1,00$	$PBIAS \leq \mp 10$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$
BOM	$0,65 < NS \leq 0,75$	$0,65 < NSlog \leq 0,75$	$\mp 10 < PBIAS \leq \mp 15$	$0,5 < RSR \leq 0,60$
SATISFATÓRIO	$0,5 < NS \leq 0,65$	$0,5 < NSlog \leq 0,65$	$\mp 15 < PBIAS \leq \mp 25$	$0,60 < RSR \leq 0,70$
INSATISFATÓRIO	$NS \leq 0,5$	$NSlog \leq 0,5$	$PBIAS > \mp 25$	$RSR > 0,70$

Fonte: Moriasi et al. (2007).

4.2.5 Influência da forma de representação da condição hidrológica

Para verificação da influência da representação da condição hidrológica de uma bacia que passa por alteração de uso e ocupação do solo, correspondente a um aumento da cobertura florestal, partiu-se do princípio de que os processos hidrológicos disponibilizam a água da chuva precipitada de diferentes formas nos ambientes. A vazão é o parâmetro mais comumente utilizado no planejamento e gestão dos recursos hídricos, indicando a água superficial disponível para os usos múltiplos. Entretanto, considerando que as alterações de uso e ocupação do solo exercem influências sobre a dinâmica do balanço hídrico e, conseqüentemente, sobre a disponibilidade hídrica nos ambientes, conhecer as diferentes formas de água disponível pode subsidiar os processos de planejamento e tomada de decisão sobre os recursos hídricos e sobre o território.

Assim, embora a vazão seja o parâmetro mais comumente utilizado no planejamento e gestão dos recursos hídricos, indicando a água superficial disponível para os usos múltiplos, a condição hidrológica de uma bacia deve representar o reflexo da alteração do uso e ocupação do solo sobre a água disponível superficial, subsuperficial e subterrânea. Neste sentido, faz-se necessária a adoção de indicadores que quantifique sua disponibilidade.

Para a definição desses indicadores, foram consideradas algumas variáveis fornecidas pelo SWAT relacionadas ao balanço hídrico (Quadro 5), a fim de explicitar o que elas representam e qual a influência em relação ao aumento da cobertura florestal evidenciados na literatura.

Quadro 5: Variáveis obtidas com o SWAT por sub-bacias.

VARIÁVEIS	DESCRIÇÃO
SUR_Q	Escoamento superficial gerado (mm)
LAT_Q	Contribuição do fluxo lateral para vazão (mm)
GW_Q	Contribuição da água subterrânea para a vazão (mm). Fluxo de base
$PERC$	Água que percola da zona da raiz durante o intervalo de tempo (mm)
$DEEP_{AQ}$	Recarga do aquífero profundo (mm)
$WYLD$	Rendimento da água para vazão (mm)
$REVAP$	Quantidade de água passando do aquífero raso para o perfil do solo (mm)
ET	Evapotranspiração real (mm)
PET	Evapotranspiração potencial (mm)
$TLOSSES$	Quantidade média de perdas de transmissão do canal (mm)

Fonte: Neitsch et al. (2011).

As variáveis $DEEP_{AQ}$ e $WYLD$ foram obtidas a partir da combinação de outras, existentes. A variável de recarga de aquífero profundo ($DEEP_{AQ}$) foi calculada multiplicando a percolação ($PERC$) pelo fator de recarga de aquífero profundo ($RCHRG_{DP}$), conforme Equação 12. O rendimento de água ($WYLD$), que consiste no somatório de contribuições das HRUs para a vazão, foi obtido pela Equação 13, conforme detalhamento obtido no manual do modelo SWAT (NEITSCH et al., 2011b).

$$DEEP_{AQ} = PERC * RCHRG_{DP} \text{ (mm)} \quad (10)$$

$$WYLD = SUR_Q + LAT_Q + GW_Q - TLOSSES \text{ (mm)} \quad (11)$$

Uma vez calibrados e validados os parâmetros do modelo, foram simuladas situações (SIT) de aumento da cobertura florestal para verificação do comportamento dessas variáveis, a fim de selecionar aquelas que pudessem ser utilizadas diretamente ou para compor indicadores da condição hidrológica. Considerando a limitação de calibração apenas da vazão, foi realizada a comparação entre cenários para que as análises pudessem ser feitas a partir das tendências observadas entre os cenários, tendo em vista que potenciais desvios nos resultados pudessem ser superados nesta avaliação comparativas. Essas situações (SIT) foram definidas de acordo com as tipologias de uso e ocupação do solo existente na RHCG: SIT 1 (9%), SIT 2 (16%), SIT 3 (26%) e SIT4 (42%). As simulações foram realizadas para o período de 1996 a 2005.

Adicionalmente, a fim de verificar a influência da variação dos estratos sobre a condição hidrológica, foram simuladas mais 3 situações, nas quais 42% do uso e ocupação da bacia foi substituído por cobertura de estrato baixo, médio e alto. Os efeitos foram avaliados de forma semelhante às situações descritas, anteriormente.

Sendo a precipitação a principal fonte de alimentação do balanço hídrico e, de modo a tornar mais perceptível as modificações das variáveis em resposta à precipitação, foram adotadas as proporcionalidades dos fluxos como potenciais indicadores da condição hidrológica em função dos totais precipitados.

4.2.6 Avaliação da influência de sistemas agroflorestais sobre a disponibilidade hídrica

4.2.6.1 Representação dos SAFs no modelo SWAT e definição de cenários

A representação desses sistemas nos modelos hidrológicos convencionais pode ser, por vezes, um fator limitante nas avaliações. O modelo SWAT possui uma estrutura restrita a uma tipologia de uso do solo por HRU, fazendo com que os modeladores optem por uma tipologia que teoricamente se aproximaria da real estrutura desses sistemas como um todo, mas que não garante o controle das espécies escolhidas para compor o sistema, ou a proporção da distribuição dos estratos (MWANGI et al., 2016).

Em sua maioria, no modelo SWAT, o SAF é representado pela “floresta mista”, fisionomia característica de climas temperados (FERNANDES, 2015; MWANGI et al., 2016), o que não permite a simulação de diferentes arranjos. Contudo, esse tipo de representação não possibilita uma avaliação da influência de diferentes arranjos sobre o território. No âmbito desse estudo, buscou-se avaliar SAFs com foco na restauração e no aumento da produtividade agrícola por unidade de área. Esses sistemas, geralmente, possuem um número reduzido de espécies por estrato e requerem operações de manejo menos intensas. Deste modo, a principal aspecto considerado na composição dos arranjos dos SAFs simulados nesse estudo foi o componente “estrato”.

Diante do exposto, buscou-se adequar a representação dos SAFs no modelo SWAT, de modo que atendesse aos principais níveis de estratos requeridos na composição de um arranjo agroflorestal. Para alcançar esses resultados, foram definidas HRUs de forma que uma tipologia existente na bacia pudesse ser desmembrada em outras diferentes tipologias, a partir de uma proporção pré-estabelecida. Por exemplo, um percentual de 100% da pastagem (PAST) poderia ser substituída por 24% de banana (BANA), 30% de café (COFF), 10% de floresta (FRSE) e 36% de seringueira (RUBR). No modelo, a classe pastagem, foi, então, tratada como exceção, garantindo que toda ela pudesse ser convertida nesta combinação.

Dessa forma, foram simulados diferentes arranjos de SAFs, definidos a partir de registros de SAFs existentes na bacia, definidos a partir de registros daqueles já existentes na RHCG. Nos arranjos foram variados os limites de estratificação conforme os utilizados pelo Programa Reflorestar/ES: ao menos 10% do SAF composto por vegetação nativa, sendo 3% estrato baixo (EB), 5% estrato médio (EM) e 2% estrato alto (EA); e máximo de espécies produtivas por estrato de 60%.

A fim de atender ao critério de estratificação na definição dos cenários, foram correlacionadas espécies-chave de cada nível de estrato com as tipologias existentes no SWAT, que correspondesse ao nível de estrato requerido, de modo que: EB correspondeu ao cultivo de café; EM, correspondeu ao cultivo de banana; e EA, correspondeu à plantação de seringueira. Para as espécies nativas, requeridas em cada arranjo, foi definida a tipologia correspondente à floresta nativa (FRSE), partindo-se do pressuposto de que esta conserva os estratos naturais da sucessão ecológica. As espécies escolhidas para a composição dos arranjos simulados são estratégicas no âmbito do Programa Reflorestar e são cultivos já presentes na RHCG, como mostrado no mapa de uso e ocupação do solo atual (Figura 11).

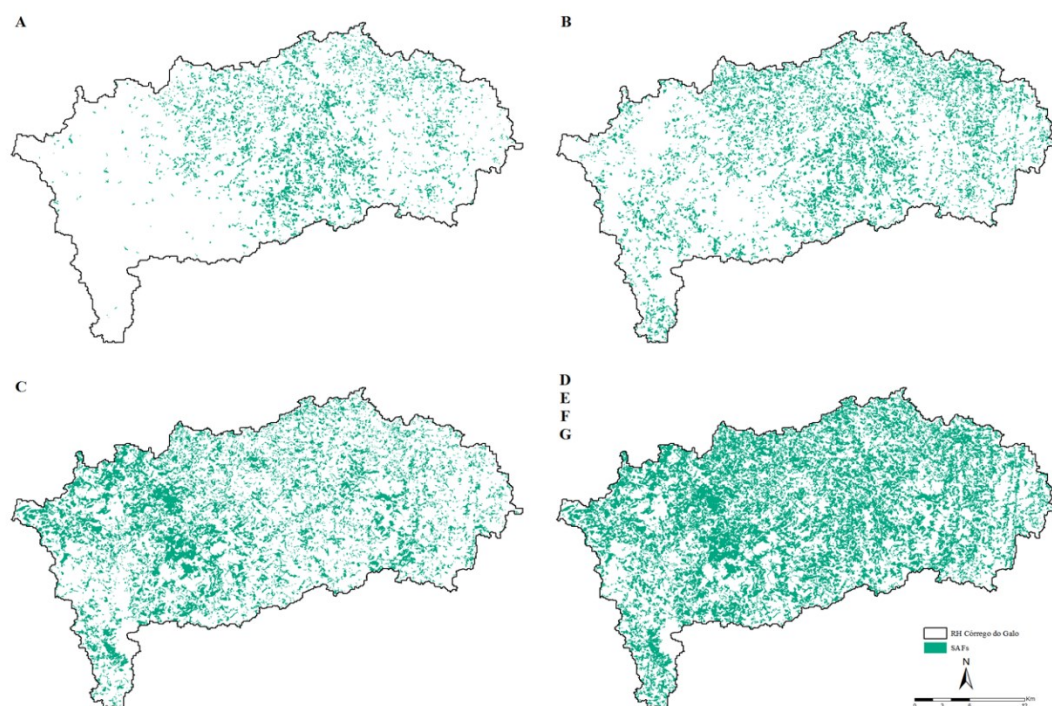
Para a definição dos cenários, foram consideradas duas abordagens: a) aumento progressivo da cobertura florestal, substituindo cultivos de monoculturas e pastagens por um mesmo arranjo de SAFs; e b) variação de arranjos de SAFs para uma mesma porcentagem de área ocupada. O Quadro 6 apresenta a descrição dos sete cenários definidos e simulados e a Figura 12 ilustra os cenários de adoção de SAFs em função do aumento de cobertura do uso e ocupação do solo.

Quadro 6: Descrição dos cenários de SAFs. EB: Estrato Baixo; EM: Estrato Médio; EA: Estrato Alto.

CENÁRIO	ALTERAÇÃO DE ÁREA	(%)	ARRANJOS DE SAFs	
			PRODUTIVAS	NATIVAS
A	Substituição de café por SAF	9	EB: 30% EM: 24% EA: 36%	EB: 3% EM: 5% EA: 2%
B	Substituição de cultivos agrícolas em geral por SAF	16		
C	Substituição de pastagens por SAF	26		
D	Substituição de pastagens e cultivos agrícolas em geral por SAF	42	EB: 10% EM: 30% EA: 50%	
E	Substituição de pastagens e cultivos agrícolas em geral por SAF	42		
F	Substituição de pastagens e cultivos agrícolas em geral por SAF	42		
G	Substituição de pastagens e cultivos agrícolas em geral por SAF	42	EB: 10% EM: 20% EA: 20%	

Fonte: Autoria própria.

Figura 12: Cenários de simulação com conversão em SAF das áreas: (A) de cultivo agrícola de Café; (B) de todos os cultivos agrícolas; (C) de Pastagem; (D, E, F e G) de Pastagem e cultivos Agrícolas, no entanto alterando das espécies produtivas (D, E e F) e nativas (G).



Fonte: Autoria própria.

4.2.6.2 Avaliação dos cenários de SAFs

As simulações dos cenários com os valores dos parâmetros do modelo calibrado consideraram como cenário de referência aquele correspondente ao uso e ocupação do solo atual (Figura 11). Para todas as simulações, foram inalterados o modelo digital de elevação, os dados meteorológicos e os dados pedológicos. O período de avaliação foi de 1996 a 2012, com passo de tempo da simulação diário e os resultados avaliados em escala temporal mensal e anual.

A avaliação dos cenários foi realizada a partir dos indicadores da condição hidrológica pré-estabelecidos no item 4.3.2. Os cenários foram comparados entre si por meio de gráficos que expuseram os indicadores e, em uma abordagem mais detalhada, os indicadores foram espacializados por sub-bacias, buscando avaliar possível modificação da condição hidrológica entre as sub-regiões da RHCG.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.3.1 Calibração e validação do modelo

A Tabela 4 apresenta as informações gerais sobre o resultado da calibração.

Tabela 4: Parâmetros do SWAT e valores obtidos na fase de calibração. As extensões dos parâmetros se referem a: águas subterrâneas (.gw);unidade de resposta hidrológica (.hru);gerenciamento/uso e ocupação (.mgt); solos.sol).

PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO	RELATIVO A	VALOR INICIAL	MÉTODO DE ALTERAÇÃO	ALTERAÇÃO	VALORES CALIBRADOS
CN2 [-]	gerenciamento	35 - 98	Multiplicação	1,21	42,34 – 98
SOL _K [mm/h]	solo	12,5 - 31,8	Multiplicação	0,22	2,75 – 6,95
SLSUBBSN [m]	Unidade de Resposta Hidrológica (HRU)	9 – 61	Multiplicação	1,75	16 – 107
RCHRG _{DP} [-]	processos de água subterrânea	0,05	Substituição	0,48	0,48
ALPHA _{BF} [dias]	processos de água subterrânea	0,048	Substituição	0,0012	0,0012
GW _{DELAY} [dias]	processos de água subterrânea	31	Adição	19	50
GWQMN [m]	processos de água subterrânea	1000	Adição	443	1443

Fonte: Autoria própria.

O “método de alteração” se refere à forma em que o parâmetro foi modificado durante a calibração, como por exemplo, a faixa de valores iniciais do parâmetro SOL_K foi multiplicada por 0,22 para obter a faixa de valores calibrados, enquanto que ao parâmetro GW_{DELAY} foram somados 19 dias e o valor inicial do coeficiente RCHRG_{DP} substituído por 0,48.

De acordo com a Tabela 4, o CN2 possui valores típicos são tabelados, variando normalmente entre 35 e 98. Com o intuito de aumentar o escoamento superficial gerado na bacia, esse parâmetro foi aumentado, passando a assumir valores entre 42,3 e 98, sendo este último o máximo valor possível adotado. O parâmetro SOL_K, que é referente à condutividade hidráulica saturada do solo e exerce influência sobre a produção de fluxo lateral, teve seus valores variando de 2,75 a 6,95, dependendo do tipo de solo da bacia. O parâmetro SLSUBBSN, que também influencia na contribuição de fluxo lateral, variou de 16 a 107m, de acordo com a HRU.

O parâmetro RCHRG_{DP}, que controla a quantidade de água que será desviada do aquífero raso, devido à percolação, para o aquífero profundo, teve seu valor inicial (0,05) substituído por 0,48. A constante ALPHA_{BF}, por sua vez, que é um índice de cálculo direto da resposta do fluxo de água subterrânea à mudanças na recarga, teve seu valor calibrado próximo de zero (ALPHA_{BF} = 0,0012 na Tabela 4), indicando uma resposta lenta para recarga (valores próximos de 1,0 indicariam resposta rápida), que é um resultado semelhante ao encontrado por Moreira et al. (2018), para a mesma região hidrográfica. O GW_{DELAY} foi calibrado pelo método de adição, sendo somados 19 dias ao seu valor inicial, 31, totalizando 50 dias de intervalo para recarga do aquífero raso. Da mesma forma o parâmetro GWQMN foi calibrado, somando-se 443 mm ao seu valor inicial, de modo que a profundidade limite de água no aquífero raso para que ocorra fluxo de base no canal ficou estabelecida em 1443mm.

A Tabela 5 apresenta os resultados das estatísticas de avaliação na estação fluviométrica 57170000 - Córrego do Galo -, enquanto que o Gráfico 1 apresenta os hidrogramas observados e simulados, com indicação dos períodos de calibração e validação. O valor de NS na fase de calibração foi de 0,7, que é considerado muito bom (MORIASI et al., 2007) e indica um bom ajuste dos picos de vazões, semelhantemente ao obtido em outros estudos realizados na bacia e regiões de entorno (PEREIRA et al., 2014; MOREIRA, 2017; TEIXEIRA, 2017; BRITO, 2015). No entanto, na fase de validação, foi observado um valor de NS de 0,4, considerado insatisfatório de acordo com a classificação proposta por Moriasi et al. (2007), por ser inferior a 0,5. No entanto, verifica-se que este valor está influenciado pelo excesso de volume simulado nos dois anos entre jul./2009 a jul./2011 (Gráfico 1). Já para as vazões nos períodos de estiagem, o modelo apresentou ajuste muito bom para os períodos de calibração e validação, com valores de NS(Log) de 0,8 e 0,7, respectivamente.

Quanto ao PBIAS, os resultados de 5,4% para calibração e 17,4% para validação podem ser considerados bons, conforme classificação adotada na metodologia (Moriasi et al., 2007), indicando desvios entre os fluxos médios simulados e observados, com superestimativas das vazões. Os valores verificados para o RSR, tanto para a calibração quanto para validação, foram de 0,5 e 0,8.

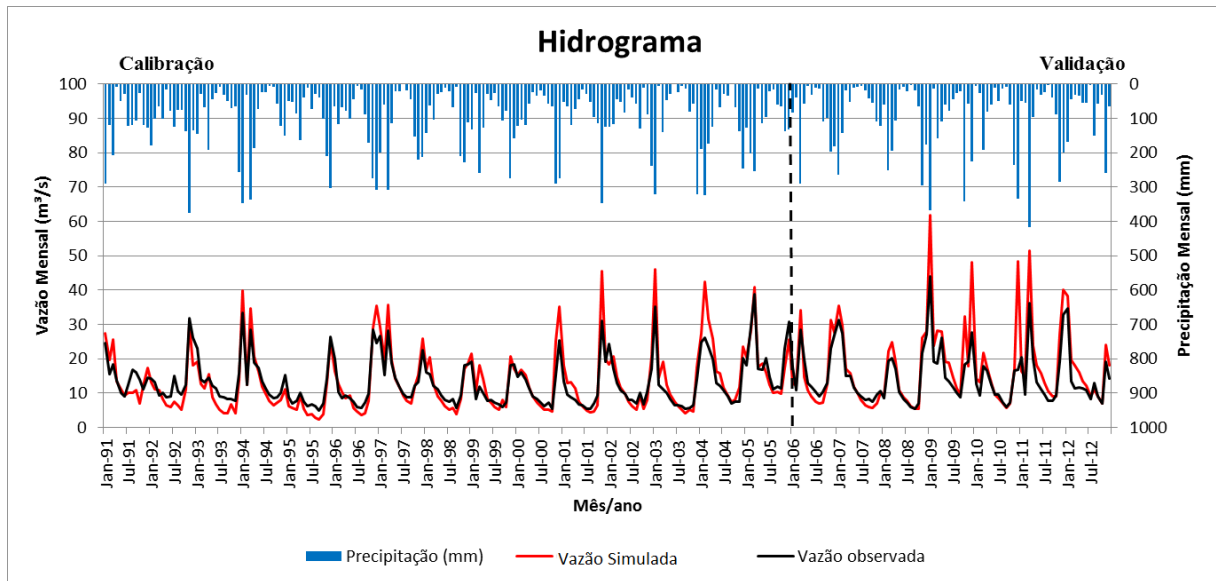
Tabela 5: Estatísticas de avaliação para as etapas de calibração e validação, na estação fluviométrica 57170000 - Córrego do Galo, disponibilizado pela Agência Nacional das Águas - ANA.

ETAPA	NS	NS(Log)	PBIAS	RSR
Simulação Inicial	-1,4	-3,1	-23,7	1,6
Calibração	0,7	0,8	-5,4	0,5
Validação	0,4	0,7	-17,4	0,8

Fonte: Autoria própria.

O hidrograma apresentado no Gráfico 1 ilustra os resultados obtidos nos processos de calibração (1991 a 2005) e validação (2006 a 2012), onde se observam valores de picos próximos dos observados, assim como um bom ajuste das vazões no período de estiagem, tanto para calibração quanto para validação. Além disso, as vazões são coerentes com a precipitação incidente, com os picos de vazão identificados nos períodos de maior precipitação. Embora o modelo ainda apresente superestimativa dos picos de vazão, principalmente para os períodos de cheias. De acordo com Pereira et al., (2016), este fato está relacionado à representação da distribuição espacial e temporal das chuvas. Devido ao fato de a distribuição das chuvas, no modelo SWAT ser realizada pela associação da sub-bacia com a estação de medição de chuva mais próxima de seu centróide, de modo que para a RHCG, com poucas estações pluviométricas, a representatividade espacial de algumas chuvas pode ter sido comprometida. Contudo, de modo geral, pode-se considerar um ajuste aceitável (ver Tabela 5).

Gráfico 1: Hidrograma dos processos de calibração (1991-2005) e validação (2006-2012) do modelo.



Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Influência da forma de representação da condição hidrológica

4.3.2.1 Influência do aumento da cobertura florestal

Para avaliar quais variáveis são mais sensíveis ao aumento da cobertura florestal na bacia hidrográfica, a Tabela 6 apresenta os resultados de cada uma delas em função das diferentes situações de alteração de aumento da cobertura florestal da bacia adotadas: SIT1 (9%); SIT2 (16%); SIT3 (26%); e SIT4 (42%).

Tabela 6: Comparação dos valores das variáveis do modelo em função da alteração do uso e ocupação do solo.

VARIÁVEL (mm)	SIT 1	SIT 2	SIT 3	SIT 4
SUR_Q	166,2	143,6	83,5	57,8
LAT_Q	77,7	81,2	91,5	96,2
GW_Q	92,1	101,1	128,4	141,7
$PERC$	271,7	289,1	338,5	363,9
$DEEP_{AQ}$	130,4	138,8	162,5	174,7
$WYLD$	336,1	326,0	303,4	295,7
$REVAP$	25,9	26,01	26,02	26,2
ET	708,0	709,9	709,9	705,8
PET	1317,5	1317,5	1317,5	1317,5
$PREC$	1222,8	1222,8	1222,8	1222,8

Fonte: Autoria própria.

Pelos resultados, verifica-se que o SUR_Q apresentou uma redução gradual significativa com o aumento progressivo da cobertura florestal, ao passo que houve aumento do LAT_Q e GW_Q , devido a maior percolação ($PERC$) da água no solo. O comportamento dessas variáveis era esperado e estão de acordo com outros estudos de aumento da cobertura florestal (BAYER, 2014; BESERRA, 2016; LIN et al., 2015; RODRIGUES, E. L., 2013; TUCCI; CLARKE,

1997). Observa-se que o rendimento (WYLD) sofreu uma redução de, aproximadamente, 40 mm (3%) com o aumento de cobertura florestal, entre a SIT 1 e SIT 4, ao passo que a $DEEP_{AQ}$ aumentou em proporção semelhante, 44mm (3,6 %), sugerindo uma redução dos rendimentos para a vazão devido à maior infiltração de água no solo e recarga dos aquíferos.

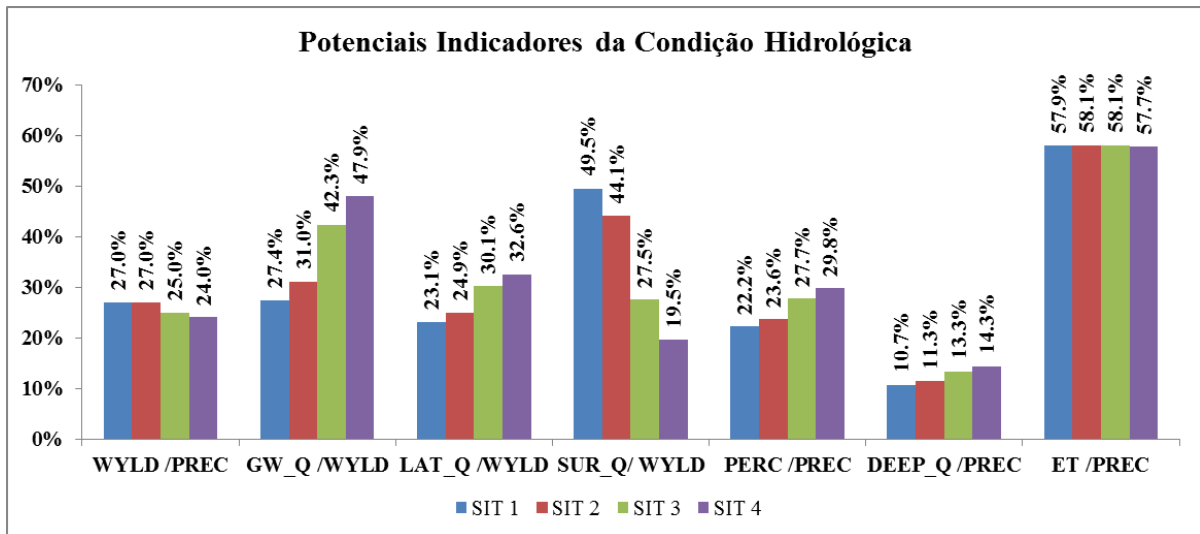
As variáveis REVAP, PET e ET não apresentaram diferenças significativas com o aumento da cobertura florestal. O REVAP, quantidade de água passando do aquífero raso para a zona insaturada, é a resposta à demanda evaporativa das plantas. Quando a água é removida da franja capilar pelo processo de evaporação, sua reposição ocorre pela água do aquífero raso subjacente (NEITSCH et al., 2011a). Portanto, sua não alteração indica que não houve condições de estresse hídrico significativos para gerar REVAP.

Deve-se considerar que a evaporação real da água existente na superfície é calculada por meio de funções exponenciais da profundidade do solo e da quantidade de água disponível, enquanto que a transpiração da planta é simulada como uma função linear da PET e do índice de área foliar, relacionados aos estágios de crescimento das plantas (NEITSCH et al., 2011a). Deste modo, para a RHCG, o processo de evapotranspiração se mostrou mais dependente da evaporação real, com valores médios da ordem de 1.500mm, do que da transpiração por cobertura do solo, com valores médios de 700mm. Assim, os aumentos das coberturas florestais avaliados nas quatro situações não exerceram grande influência, de fato, no valor final para a bacia. Deve-se considerar ainda uma compensação entre a redução da evaporação e ao aumento da evapotranspiração das florestas.

A evapotranspiração simulada na RHCG foi da ordem de 60% da precipitação. Em estudo relacionado, que avaliou os impactos hidrológicos da alteração da cobertura florestal em uma bacia do nordeste brasileiro, Andrade et al. (2017) encontraram valores semelhantes, em que a evapotranspiração permaneceu praticamente inalterada para cenários de reflorestamento de até 50% de alteração da cobertura florestal. Além disso, a redução da evapotranspiração com o aumento da cobertura florestal, pode ser atribuído ao aumento da percolação da água no solo (FRANCESCONI et al., 2016).

Para tornar mais perceptível as modificações das variáveis em resposta à precipitação, foram adotadas as proporcionalidades dos fluxos como potenciais indicadores da condição hidrológica em função dos totais precipitados e contribuições para a vazão. Os resultados são apresentados no Gráfico 2. Adicionalmente, como critério de comparação, o Gráfico 3 ilustra o comportamento das vazões nas situações avaliadas.

Gráfico 2: Potenciais Indicadores da Condição Hidrológica.



Fonte: Autoria própria.

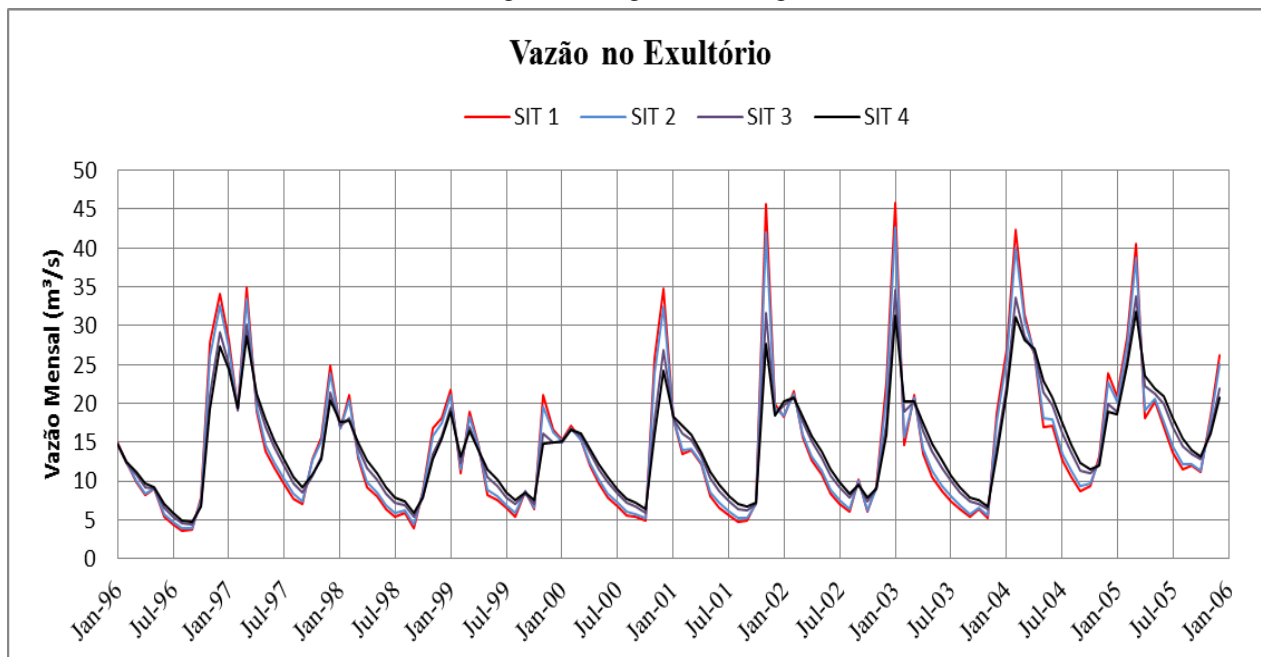
O potencial indicador de rendimento total das contribuições para a vazão nos rios ($WYLD$) obteve variação percentual pouco significativa (3%) com o aumento da cobertura florestal. Os rendimentos entre a SIT1 e SIT2 permaneceram percentualmente inalterados. Já entre a SIT2 e SIT3 verificou-se uma redução de 2% e entre a SIT3 e SIT4, uma redução de 1%, que podem ser insignificantes considerando a precisão do modelo. Por outro lado, essa pequena diferença pode ser explicada pela variação observada entre os potenciais indicadores que compõe o $WYLD$ ($SUR_Q/WYLD$, $GW_Q/WYLD$ e $LAT_Q/WYLD$) com a variação da cobertura florestal, conforme exemplificado a seguir.

A relação entre o escoamento superficial sobre o rendimento total ($SUR_Q/WYLD$) foi a que mais sofreu alterações com o aumento da cobertura florestal, sendo observada uma redução de 30% entre SIT1 e SIT4. O reflexo da redução do escoamento superficial sobre as vazões também pode ser observado no hidrograma do Gráfico 3, o qual apresenta uma redução significativa dos picos de vazão na bacia (por exemplo, no ano de 2002 e 2003 os picos reduziram em até 14 m³/s, o equivalente a 31%). Por outro lado, a variação das contribuições dos fluxos de base ($GW_Q/WYLD$) e lateral ($LAT_Q/WYLD$) para a vazão foram da ordem de 20 e 10%, respectivamente, entre a SIT 1 e SIT4. A diferença mais significativa de contribuição do fluxo de base ($GW_Q/WYLD$) foi percebida entre SIT 2 e SIT3, com aumento de 11%.

A razão entre a percolação da água no solo e a precipitação total da bacia aumentou em 2% (SIT1-SIT2), 4% (SIT2-SIT3) e 2% (SIT3-SIT4), com um aumento percentual total de 8% (SIT1-SIT4). A percolação tem a importante função de alimentar a recarga dos aquíferos rasos e profundos. Desse processo é extraído o fluxo de base que mais contribui com as vazões nos períodos de estiagem. Influenciado pela percolação, a $DEEP_Q/PREC$ também apresentou aumento progressivo, porém em menor magnitude, variando de 10,7 a 14,3% do total precipitado. Valores semelhantes foram encontrados por Pereira et al. (2010), em estudo experimental realizado em remanescente de Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira, via balanço hídrico, em que a recarga de aquíferos profundos foi estimado em 13,6%. A relação

ente o total evaporado e a precipitação ($ET/PREC$) permaneceu praticamente inalterada, visto que a evapotranspiração não apresentou alterações significativas entre as situações simuladas, o que pode ter contribuído para o aumento da percolação e do fluxo de base associado, além disso, deve-se considerar que a pouca variação do $ET/PREC$ pode estar associada ao aumento da percolação da água no solo, para a recarga de aquíferos (FRANCESCONI et al., 2016).

Gráfico 3: Hidrograma da região do Córrego do Galo.



Fonte: Autoria própria.

4.3.2.2 Influência dos Níveis de Estratos

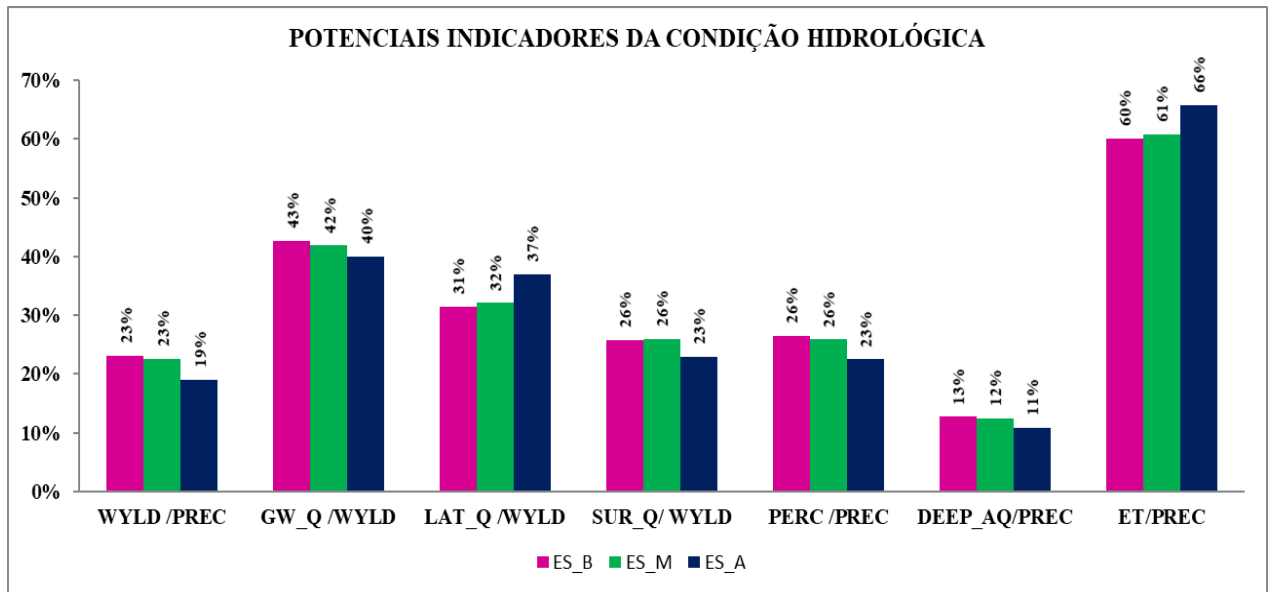
A influência dos níveis de estratos sobre a representação da condição hidrológica da bacia pode ser observada na Tabela 7 e no Gráfico 4, os quais apresentam o comportamento dos potenciais indicadores à adoção de coberturas predominantemente de estrato baixo (ES_B), estrato médio (ES_M) e estrato alto (ES_A), conforme segue.

Tabela 7: Comparação dos valores em função da alteração do uso e ocupação do solo.

VARIÁVEL	ES_B	ES_M	ES_A
SUR_Q	73.1	71.7	53.6
LAT_Q	89.2	88.8	86.3
GW_Q	121.0	115.8	93.3
$PERC$	324.0	316.6	275.6
$DEEP_{AQ}$	155.5	152.0	132.3
$WYLD$	283.3	276.4	233.1
$REVAP$	26.0	26.0	26.2
ET	735.5	743.3	804.3
PET	1317.5	1317.5	1317.5
$PREC$	1222.8	1222.8	1222.8

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 4: Potenciais Indicadores da Condição Hidrológica – Componente Estratos.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que as variações foram percentualmente imperceptíveis entre as situações com predominância de estratos baixos e médios, sendo verificadas reduções de 1% dos rendimentos totais para a vazão ($WYLD/PREC$), contribuição do fluxo de base para a vazão ($GW_Q/WYLD$) e recarga de aquífero profundo ($DEEP_{AQ}/PREC$) e aumento de 1% de contribuições do fluxo lateral, entre as mesmas situações. Esse comportamento pode ser atribuído ao sistema radicular mais superficial, que não favorece a disponibilidade hídrica no perfil do solo (ALVES, 2014; BACELLAR, 2005). Os potenciais indicadores demonstraram maior sensibilidade para a adoção de espécie de estrato alto (ES_A), para o qual se verifica um aumento de 5% da $ET/PREC$ comparado à situação de estrato baixo (ES_B), pois, apesar do favorecimento da infiltração e da percolação da água no solo, o sistema radicular mais desenvolvido das espécies de ES_A absorvem maior quantidade de água, retornando-a para a atmosfera via transpiração (BACELLAR, 2005). Nessa situação, o $WYLD/PREC$ reduziu 4%; a dinâmica de contribuição também foi alterada, com redução de 3% das contribuições do fluxo de base com a vazão, sendo compensado com redução de 3% do escoamento superficial e aumento de 5% das contribuições do fluxo lateral. A percolação foi reduzida em 3%, ao passo que a recarga de aquífero profundo teve uma redução de apenas 1%.

Embora hidrogramas permitam que sejam feitas importantes avaliações em termos de disponibilidade hídrica, uma avaliação das variáveis do balanço hídrico da região simulada pelo modelo sugere que a movimentação do fluxo de água desde a precipitação até a sua chegada ao curso d'água pode ser substancialmente variável em função da alteração da cobertura vegetal.

Seguindo essa linha de análise, a condição hidrológica de uma bacia deve ser representada por indicadores que abranjam os processos hidrológicos mais fortemente alterados em função do aumento da cobertura florestal. A proporcionalidade dos fluxos apresentada nos Gráfico 2 e Gráfico 4 demonstra a alteração das variáveis de acordo com o aumento da cobertura florestal e predominância de estratos, respectivamente. Sendo assim, as que apresentaram maior

sensibilidade às alterações de uso e ocupação do solo foram considerados neste estudo como indicadores da condição hidrológica: $WYLD/PREC$; $GW_Q/WYLD$; $LAT_Q/WYLD$; $SUR_Q/WYLD$; $PERC/PREC$. Foi com base nestes indicadores que a avaliação da influência de sistemas agroflorestais sobre a condição hidrológica de bacias hidrográficas foi feita e apresentada na seção seguinte.

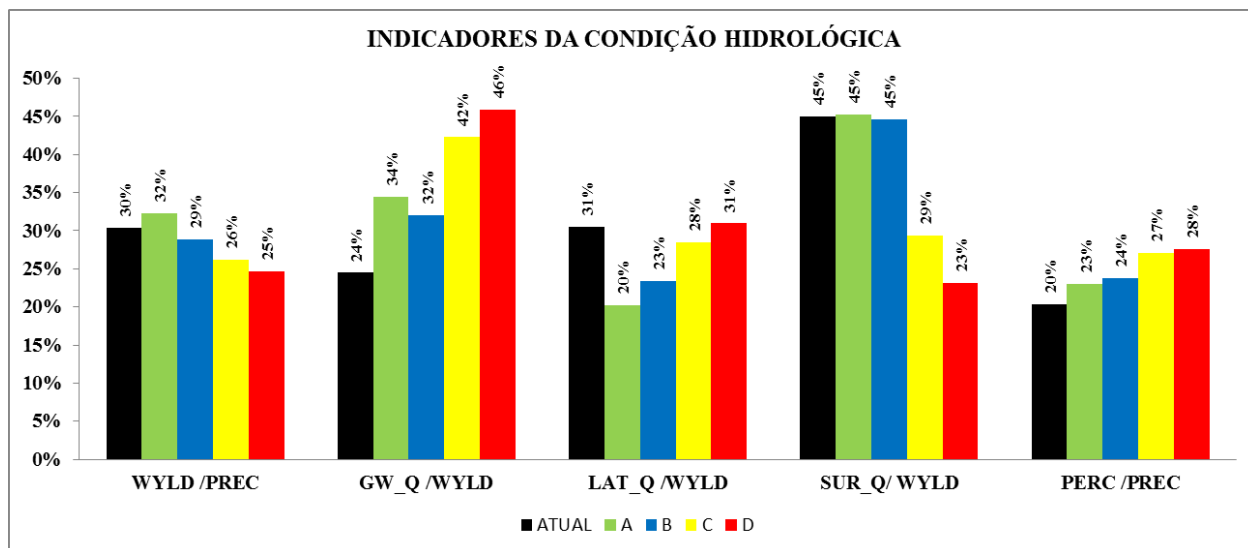
A relação $ET/PREC$ não foi incluída como indicador da condição hidrológica por não ter apresentado sensibilidade diante do aumento da cobertura florestal na RHCG. Contudo, deve-se considerar que variável ET é de grande relevância nos estudos de respostas hidrológicas às alterações de uso e ocupação do solo (DENJEAN et al., 2017; GIRI; ARBAB; LATHROP, 2018). A $DEEP_{AQ}/PREC$, por outro lado, embora tenha apresentado variação com as alterações da cobertura florestal, não foi incluída por ser obtida diretamente da $PERC/PREC$, no modelo SWAT, permitindo que as recargas de aquíferos profundos possa ser avaliada de forma indireta por esse último indicador.

4.3.3 Avaliação de sistemas agroflorestais sobre a disponibilidade hídrica

4.3.3.1 Influência do aumento de SAFs

Nesta primeira abordagem, buscou-se avaliar a influência desses sistemas em função do aumento de sua área de cobertura no território (cenários A, B, C e D). Com base nos indicadores definidos na etapa anterior, o Gráfico 5 apresenta a variação da condição hidrológica da bacia para os diferentes cenários de SAFs simulados.

Gráfico 5: Indicadores da condição hidrológica da RHCG – Comparação entre os cenários de aumento da cobertura de SAFs.



Fonte: Autoria própria.

A substituição de coberturas de monoculturas e pastagens por SAFs produziu impactos graduais sobre a condição hidrológica da RHCG. No que se refere à produção de água que contribui para as vazões nos cursos d'água ($WYLD/PREC$), observa-se um aumento de 2% entre o cenário atual e o cenário A, seguido de redução progressiva desse indicador com o

aumento da cobertura de SAFs: 3%, entre os cenários A-B e B-C; e 1% entre os cenários C e D. Contudo, num quadro geral, verifica-se uma redução de 5% entre o cenário atual e o cenário D.

No cenário atual, o SUR_Q corresponde a 45% do total de contribuições para a vazão, enquanto que no cenário D essa proporção reduz para 23%. A redução da contribuição do escoamento superficial para as vazões pode ser decorrência do aumento da infiltração (MWANGI et al., 2016; ONG et al., 2014). Por outro lado, a relação $SUR_Q/WYLD$ se mostrou mais sensível às modificações de grandes áreas de cobertura, uma vez que nos cenários A e B, em que o aumento da cobertura de SAFs foi de 9 e 16%, respectivamente, o indicador permaneceu inalterado.

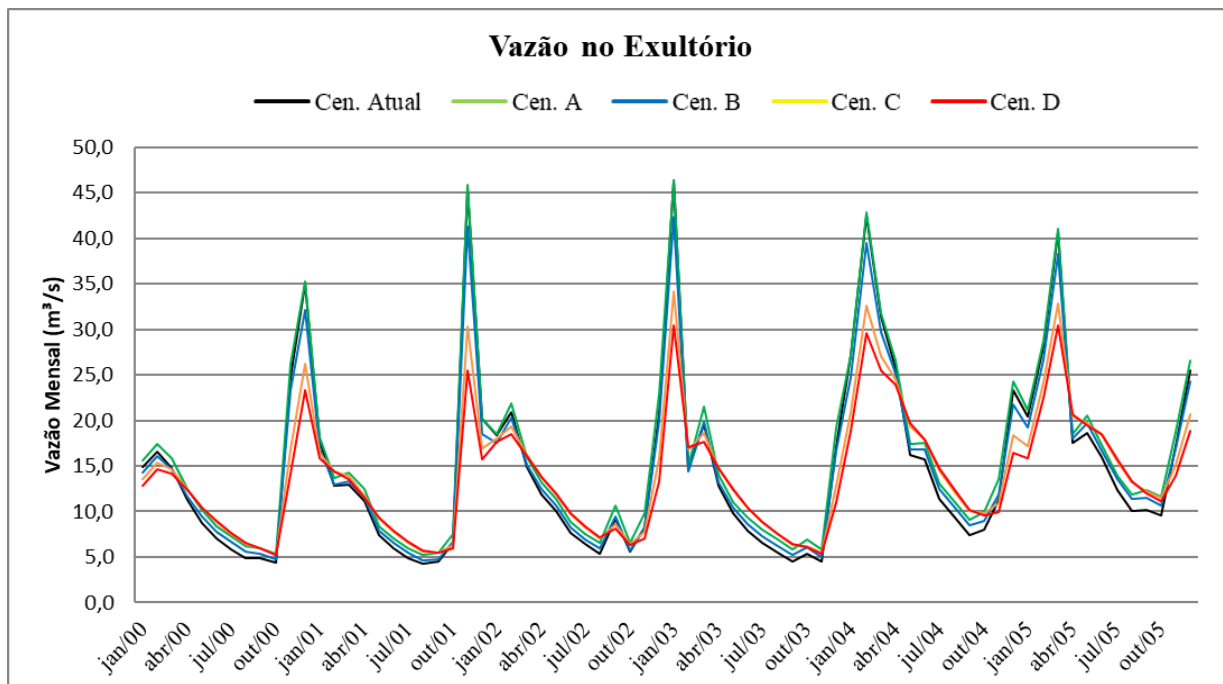
Além disso, é importante considerar que o arranjo agroflorestal simulado incorpora fisionomias vegetais já existentes na região, como o café e a banana. A redução mais significativa pode ser observada quando as pastagens (26% da área) são substituídas pelos SAFs. O que é coerente, visto que as pastagens apresentam elevadas taxas de escoamento superficial, se comparada a outros cultivos. O comportamento do escoamento superficial está de acordo com a discussão do item anterior (4.3.2). Esses efeitos se devem às condições de cobertura florestal que favorecem a diminuição desse indicador com o aumento de coberturas florestais, como o SAF (ONG et al., 2014).

Diferentes estudos apontam que as alterações de uso e ocupação do solo são os fatores que influenciam no escoamento superficial de uma bacia (ANDRADE et al., 2017; CARVALHO, 2014; SOUZA, 2015) e nos picos de vazões nos rios (BLAINSKI et al., 2014; SILVA et al., 2015). O Gráfico 6 ilustra essa situação, no qual é possível perceber a tendência de diminuição dos picos nos períodos de cheias (novembro a abril de cada ano) com o aumento da cobertura de SAFs. É importante considerar que os picos mencionados referem-se aos picos das vazões mensais, e não diários, que indicam redução da vazão média mensal (SAJIKUMAR; REMYA, 2015) e não picos de inundação decorrente de um evento de precipitação. Essa situação é confirmada pelo Gráfico 7, onde é possível observar a redução das vazões de pico comparado ao cenário atual, principalmente para os cenários C e D, conforme ilustrado na curva de permanência das vazões. Verifica-se que as vazões mais frequentes são coincidentes em todos os cenários avaliados, incluindo o cenário atual, indicando pequena variação das vazões, médias. Além disso, é possível observar um aumento discreto das vazões no período de estiagem com o aumento da cobertura de SAFs, que se refere às vazões que são igualadas ou superadas na maior parte do tempo (90 a 95%). Considerando que, no Espírito Santo, a vazão de referência utilizada como parâmetro para emissão de outorga de direito de uso da água, os resultados sugerem aumento incremental de aproximadamente 1,0 m³/s na disponibilidade hídrica para emissão da outorga na região avaliada.

De acordo com Ong et al. (2014), pode-se considerar também, de forma indireta, que o escoamento superficial tenha sido reduzido devido às melhores condições do solo proporcionadas pelos SAFs, que tendem a aumentar a infiltração devido ao sistema radicular

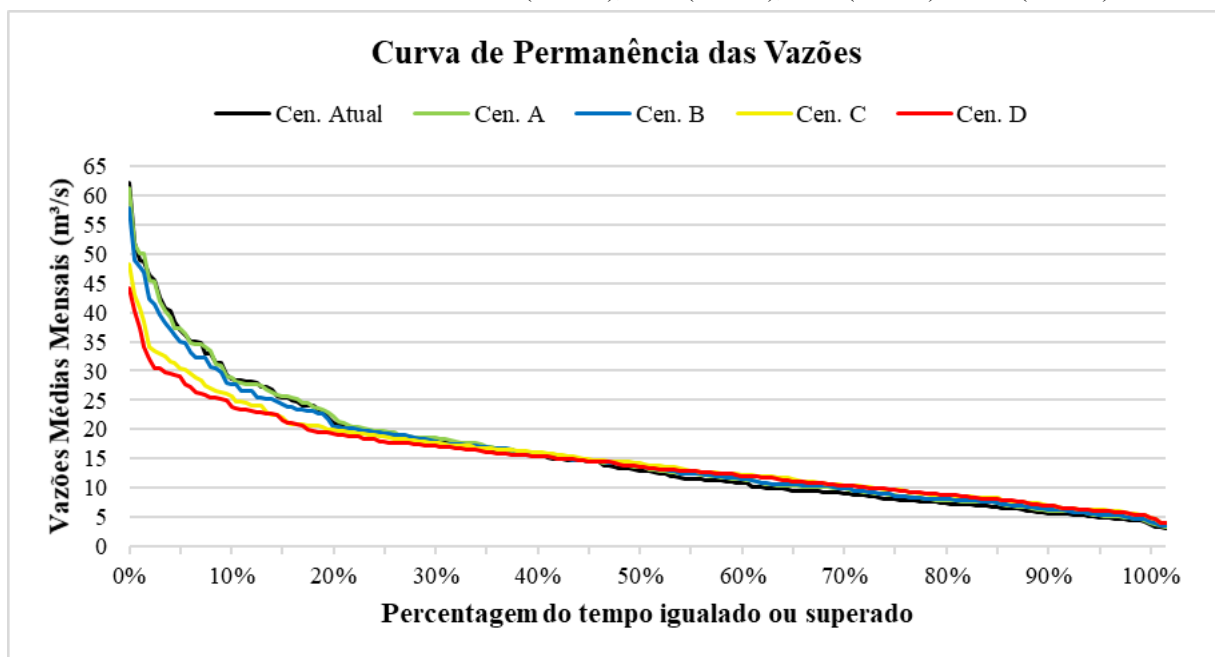
dos diferentes estratos das espécies que os compõem, contribuindo para o aumento da disponibilidade hídrica em outros processos subsuperficiais e subterrâneos .

Gráfico 6: Hidrograma dos cenários de aumento da cobertura de SAFs no período de 2000 a 2005. Comparativo entre o cenário atual de uso e ocupação do solo e os cenários de simulação de aumento da cobertura de SAFs em 9% (Cen. A), 16% (Cen. B), 26% (Cen. C) e 42% (Cen. D). O período de 2000 a 2005 foi considerado neste gráfico apenas para que as alterações sejam visualmente mais perceptíveis, mas o período total de simulação foi de 1996 a 2012.



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 7: Curva de permanência das vazões médias mensais da RHCG, para o período total de simulação de 1996 a 2012. Comparativo entre o cenário atual de uso e ocupação do solo e os cenários de simulação de aumento da cobertura de SAFs em 9% (Cen. A), 16% (Cen. B), 26% (Cen. C) e 42% (Cen. D).



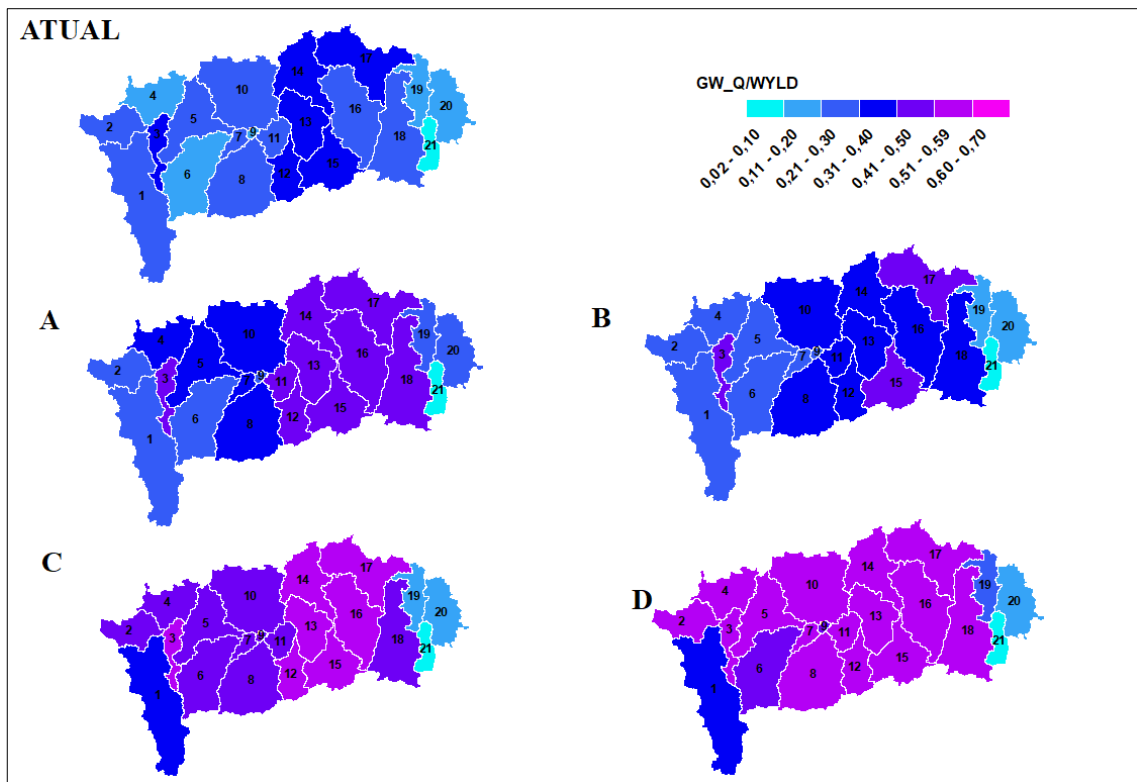
Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que, embora o $SUR_Q/WYLD$ tenha sido reduzido consideravelmente, o impacto sobre o rendimento total ($WYLD/PREC$) foi atenuado devido ao aumento dos fluxos lateral ($LAT_Q/WYLD$) e de base ($GW_Q/WILD$), que compensaram a redução do primeiro indicador. O $LAT_Q/WYLD$ sofreu uma redução de 9% no primeiro cenário de aumento dos SAFs, o que seria condizente com a introdução de outras espécies de estratos médios e altos, no cultivo do café pré-existente, possivelmente devido ao aumento da transpiração da vegetação, que é representativo do maior consumo de água na zona das raízes, incluindo as camadas mais profundas. Mwangi et al. (2016), quando avaliou os impactos da adoção de SAFs com fins de produção madeireira em Mara, no leste da África, verificou um comportamento semelhante em relação a este indicador, com redução do fluxo lateral em função da introdução de espécie de raízes profundas. O autor verificou reduções de 5, 11 e 20%, com o aumento progressivo da área de SAFs de 6,4%, 14,4% e 27,9%, respectivamente.

Parte da água que percola fica armazenada no aquífero raso, sendo posteriormente convertida em fluxo de base. Isso levou ao aumento do indicador $GW_Q/WYLD$, na maioria dos cenários avaliados, como um aumento de 10%, do cenário atual para o cenário A. Observa-se uma ligeira redução desse indicador do cenário A para o cenário B, compensado pelo aumento do fluxo lateral, neste mesmo cenário. Por outro lado, no cenário D seu aumento foi de 22%, chegando a 46% de todas as contribuições naquele cenário, demonstrando o potencial de contribuição dos SAFs para as vazões. A $PERC/PREC$ aumentou progressivamente conforme o aumento da cobertura de SAFs. No cenário atual seu valor representou 20% do total precipitado, enquanto que no cenário D chegou a 28%. Era esperado que esse indicador aumentasse com a redução do escoamento superficial. Deste modo, assume-se que a adoção de SAFs promove o aumento progressivo da recarga dos aquíferos. Além disso, a água que percola no perfil do solo pode retroalimentar a zona de raízes, contribuindo para a manutenção da umidade do solo.

Da Figura 13 a Figura 17 são ilustradas a distribuição espacial dos indicadores da condição hidrológica da RHCG. No cenário atual da RHCG, as suas regiões alta e média abrangem extensas áreas de pastagens e cultivos agrícolas diversos, sobretudo de café, para as quais se espera que a substituição dessas coberturas por SAFs interfiram mais na condição hidrológica dessas regiões, que na região mais baixa da bacia. A avaliação realizada está mais voltada para as sub-bacias de cabeceira (1, 2, 4, 6, 8,10, 12, 14, 15 e 17), por não sofrerem interferência de outras sub-bacias adjacentes.

Figura 13: Distribuição do $GW_Q/WYLD$ na RHCG para os cenários de aumento da cobertura de SAFs.

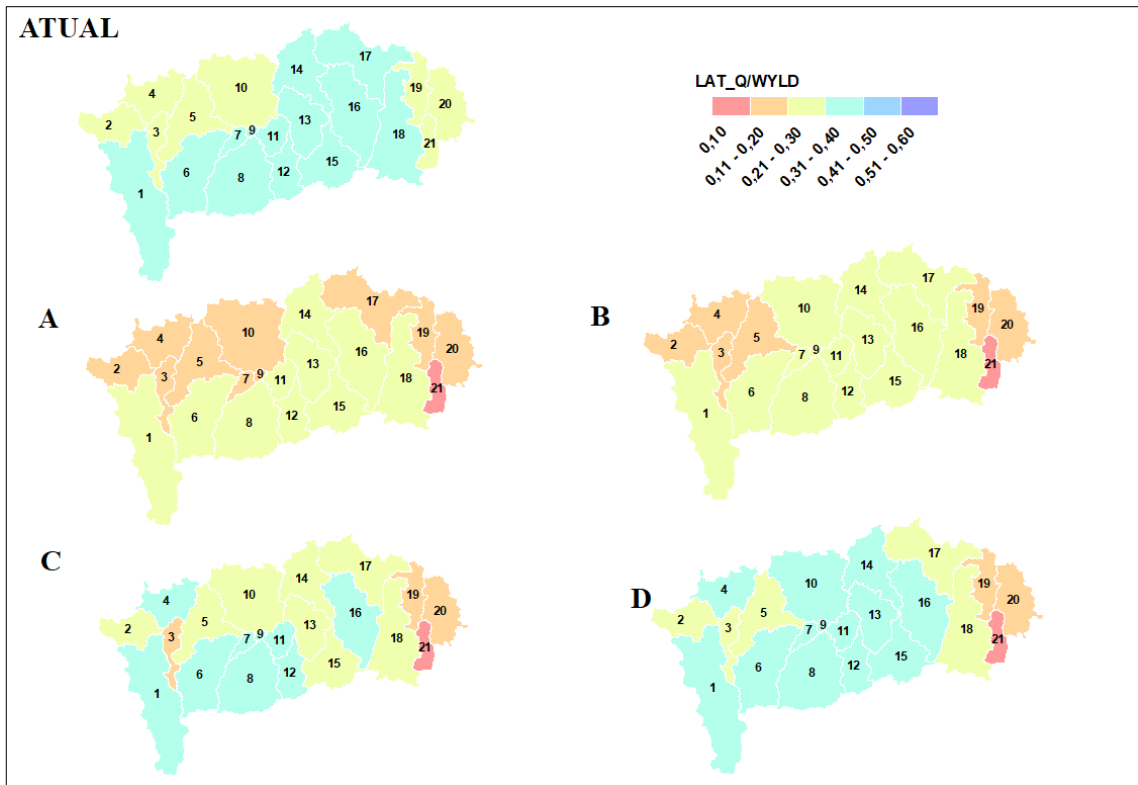


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 13, no cenário A, $GW_Q/WYLD$ é maior na região mais central da RHCG, onde, originalmente, há maior recorrência de cultivo de café (sub-bacias 11 a 18), e, portanto, as modificações do indicador é mais perceptível nesse cenário. Observa-se que esta região manteve os níveis elevados do indicador em praticamente todos os cenários avaliados. O aumento gradual da contribuição do fluxo de base para a vazão se deu com o aumento da área de cobertura de SAFs. A contribuição para a vazão nos cursos d'água se mostrou fortemente dependente do fluxo de base na maioria das sub-bacias da região.

Na Figura 14, verifica-se que o aumento de SAFs reduziu o indicador de contribuição do fluxo lateral para as vazões ($LAT_Q/WYLD$), nos cenários A e B, e aumentou o indicador para os cenários C e D. Nos cenários A e B, que houve aumento de 9 e 16% da cobertura de SAFs, esse indicador se comportou de forma semelhante, sendo reduzido em até 20% em ambos os cenários. Já nos cenários C e D, $LAT_Q/WYLD$, aumenta progressivamente, de modo que o cenário D se assemelha ao cenário ATUAL, em que a maioria das sub-bacias apresenta contribuições de fluxo lateral para as vazões variando de 21 a 40% do total. Observa-se, ainda, que as sub-bacias que mais sofrem alteração para esse indicador são as da parte alta e média da RHCG, por serem aquelas onde a maior parte da sua superfície sofreu alteração da cobertura.

Figura 14: Distribuição do LAT_Q na RHCG para os cenários de aumento da cobertura de SAFs.

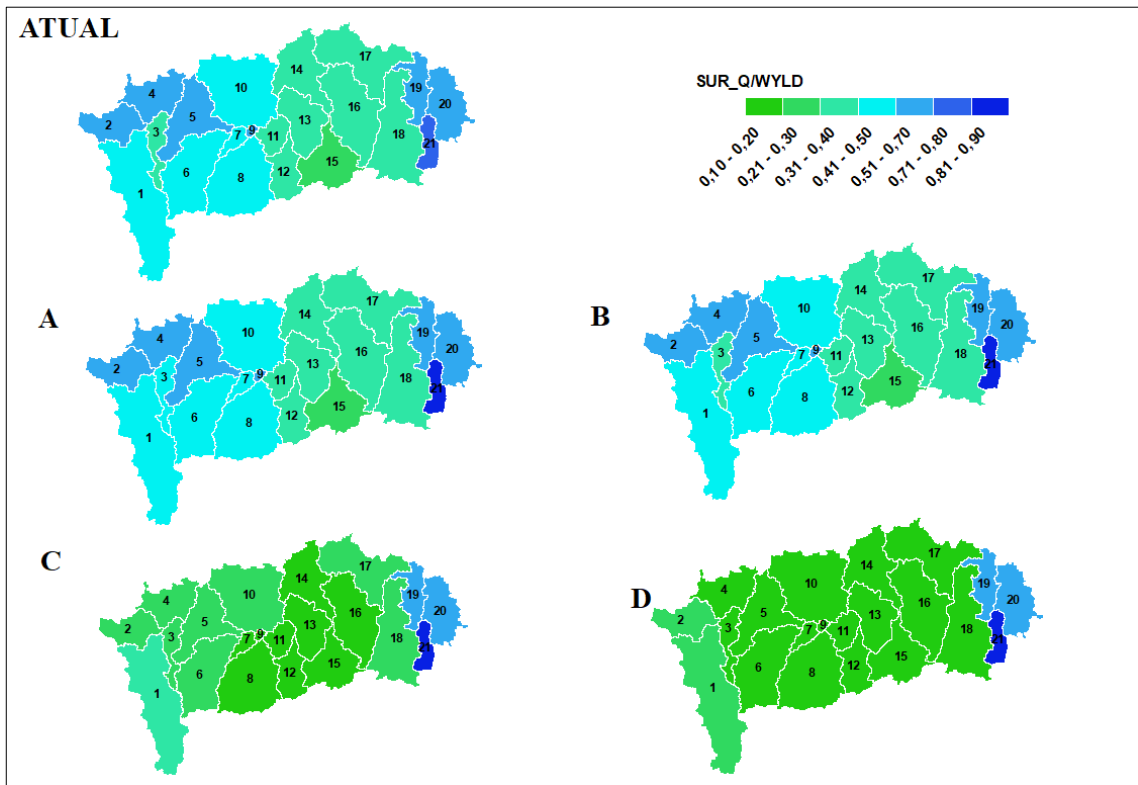


Fonte: Autoria própria.

A elevação dos indicadores anteriormente descritos implica na redução significativa da dependência das contribuições das vazões do escoamento superficial, conforme é ilustrado na

Figura 15, em que se observa, no cenário ATUAL, $SUR_Q/WYLD$, variando de 41 a 80%, na região mais alta da bacia, comparada ao cenário D, em que o indicador não ultrapassa 30% na maior parte da RHCG. Entretanto, essa redução só pode ser de fato observada nos cenários em que a adoção de SAFs foi igual ou superior a 26% (cenários C e D). As sub-bacias da parte alta apresentam elevados percentuais de $SUR_Q/WYLD$, mesmo para os cenários de maior cobertura de SAFs, como é observado nas sub-bacias 1 e 2, nas quais esse indicador se manteve superior a 30% em todos os cenários avaliados.

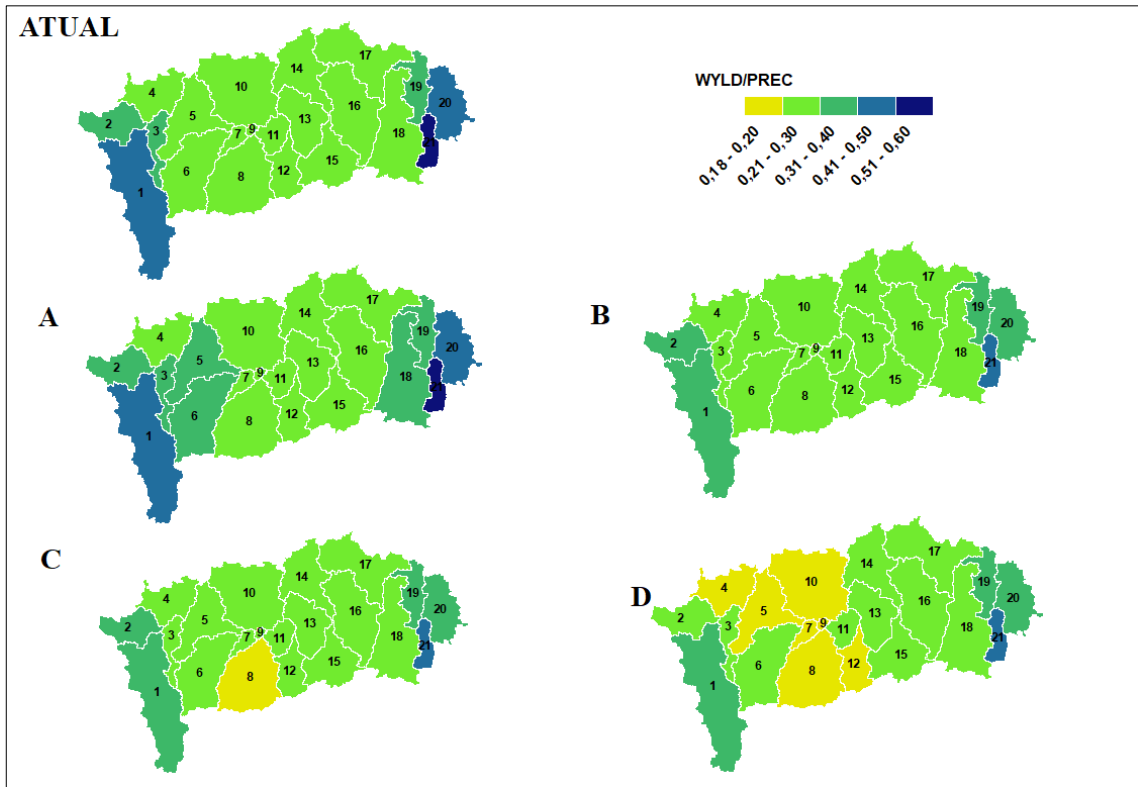
Figura 15: Distribuição do SUR_Q na RHCG para os cenários de aumento da cobertura de SAFs.



Fonte: Autoria própria.

Toda essa dinâmica do $GW_Q/WYLD$, $LAT_Q/WYLD$ e $SUR_Q/WYLD$ contribuiu para que os rendimentos totais (Figura 16) na RHCG permanecessem em um nível regular em todos os cenários avaliados. Com a inclusão dos SAFs nas áreas mais baixas da RHCG, o $WYLD/PREC$ passou a ser mais uniformemente distribuído, nos cenários D e E. A ampliação de SAFs reduziu a contribuição para as vazões médias nos rios de modo geral, mas, por outro lado, permitiu maior recarga de aquíferos rasos e profundos, devido ao aumento da percolação que, conforme observado na Figura 17, na qual se verifica um aumento da $PERC/PREC$ em praticamente todas as sub-bacias.

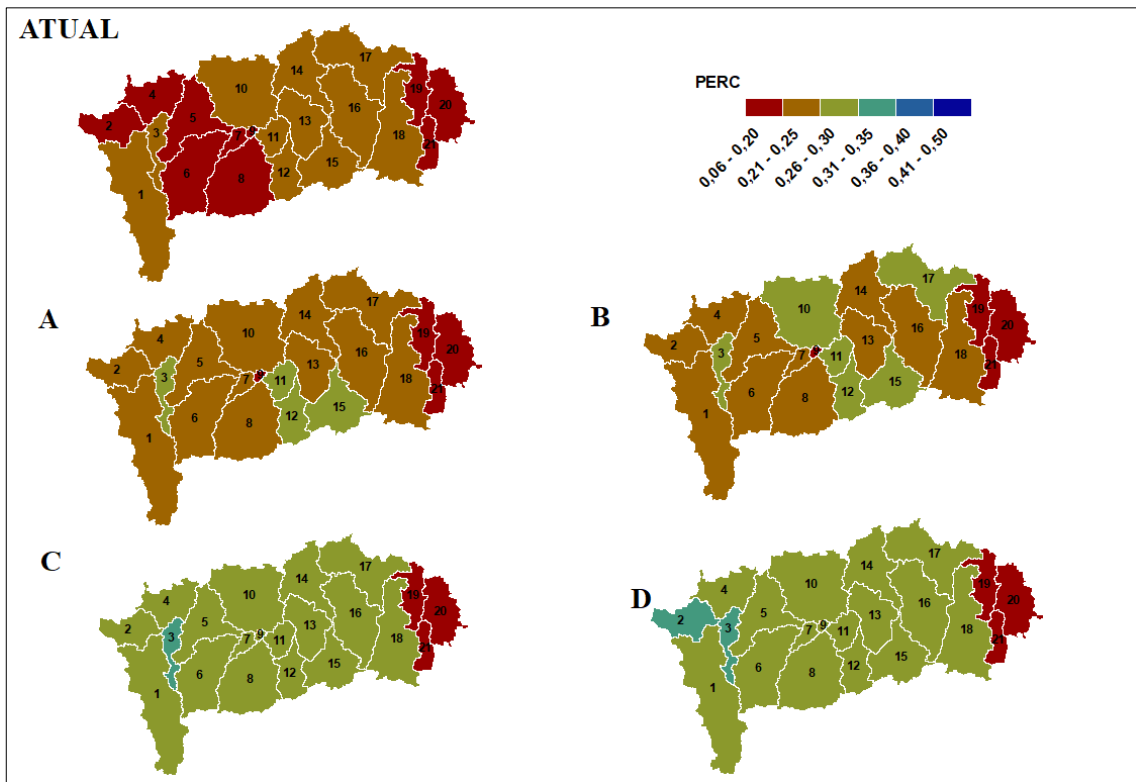
Figura 16: Distribuição da $WYLD/PREC$ na RHCG para os cenários de aumento da cobertura de SAFs.



Fonte: Autoria própria.

O indicador $PERC/PREC$ sofreu alterações notáveis já para o primeiro cenário de aumento de SAFs, cenário A (9%), principalmente para as sub-bacias 2, 4, 6 e 8, localizadas na porção alta da RHCG. Entre os cenários A e B o indicador $PERC/PREC$ aumentou, em B a percolação representou até 30% das precipitações, nas sub-bacias 10, 12, 15 e 17. No cenário C o $PERC/PREC$ aumentou para quase todas as sub-bacias. Esse indicador permaneceu praticamente inalterado no cenário D, de maior aumento de SAFs. Do ponto de vista ambiental, o aumento da percolação é importante e está diretamente associado a condições melhores do solo (BESERRA, 2016). Além disso, a elevação do $PERC/PREC$ indica potencial elevação da recarga de aquíferos profundos, que estão mais distantes da superfície nessas regiões de topografia mais elevada, como nas bacias de cabeceira (CECÍLIO; PIMENTEL; ZANETTI, 2019).

Figura 17: Distribuição do PERC/PREC na RHCG para os cenários de aumento da cobertura de SAFs.



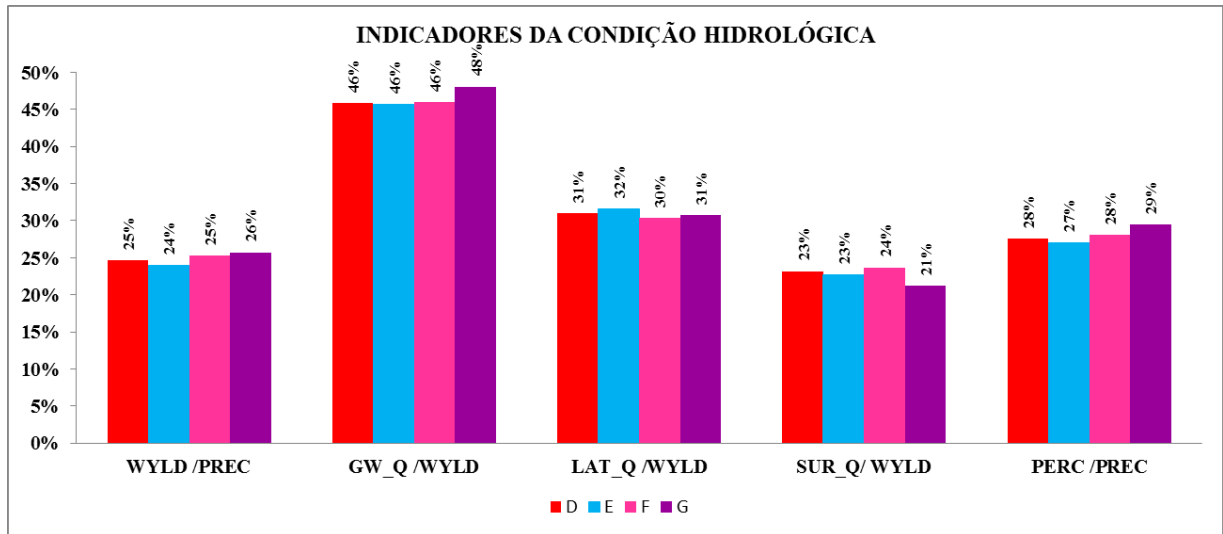
Fonte: Autoria própria.

Os mapas de distribuição dos indicadores por sub-bacias, apresentados anteriormente, demonstram a mesma tendência global da RHCG, contudo, o comportamento dos indicadores da condição hidrológica também variou conforme a localização no território, tendo em vista, que o percentual de alteração do uso e ocupação do solo não é o mesmo em todas as sub-bacias. As sub-bacias de montante desmontaram-se mais sensíveis ao estabelecimento dos SAFs, devido ao fato dessa região ser a que mais sofreu alterações de uso e ocupação do solo. Os efeitos puderam ser percebidos, neste caso, principalmente para os indicadores de contribuição para as vazões e de percolação da água no solo.

4.3.3.2 Influência dos Níveis de Estratos

Neste tópico, buscou-se avaliar a influência de diferentes arranjos, nos quais foram variadas as proporções dos estratos, tomando como referência alguns arranjos existentes na região (cenários D, E, F e G). O Gráfico 8 apresenta a variação da condição hidrológica da bacia para os cenários de diferentes arranjos de SAFs.

Gráfico 8: Indicadores da condição hidrológica da RHCG – Comparação entre os cenários de diferentes arranjos de SAFs.



Fonte: Autoria própria.

Os cenários utilizados para a avaliação dos diferentes arranjos de SAFs em função dos estratos, não apresentaram variações percentuais significativas dos indicadores da condição hidrológica. A partir da modelagem realizada, verifica-se que a condição hidrológica de uma bacia que passa por modificações de uso e ocupação do solo por adoção de SAFs é mais sensível ao aumento da área de cobertura por esses sistemas do que ao arranjo em si. Contudo, recomenda-se que outras avaliações possam ser realizadas buscando identificar diferenças locais devido ao arranjo dos SAFs.

O cenário G apresentou as maiores variações de indicadores, comparado aos demais (D, E e F). O indicador $GW_Q/WYLD$ aumentou 2% em relação aos demais, o $SUR_Q/WYLD$ reduziu 3%. Este cenário é composto por 50% de espécies nativas e 50% de espécies produtivas. O estrato predominante nesse arranjo foi o estrato médio, seguido do alto e, em menor proporção, do estrato baixo. Essa característica do arranjo agroflorestal implica no balanço hídrico. Como mencionado, espécies de estratos maiores tendem a possuir raízes mais profundas, que favorecem o aumento da percolação, como representado pelo resultado das simulações no Gráfico 9, com consequente aumento do fluxo de base e redução do escoamento superficial; mesmo que de forma discreta, como nos cenários simulados. Além disso, essas espécies influenciam no microclima, como a redução da temperatura local, e contribui com o aumento da umidade disponível para as plantas de estratos menores, sob a copa das árvores (RIBASKI; MONTOYA; RODIGHERI, 2001).

Resultado semelhante pode ser observado no cenário E, que possui o maior percentual de vegetação de estrato alto e, como esperado, apresentou uma redução da $PERC/PREC$, indicando uma maior demanda de água na zona de raízes. Consideram-se, ainda, fatores que potencializam a infiltração da água no solo, favorecendo a percolação para camadas inferiores, após a introdução de SAFs, tais como a elevação do teor de matéria orgânica, o aumento da microfauna do solo e o aumento do fluxo nos macro poros devido à presença de raízes vivas ou mortas (MWANGI et al., 2016). Esse tipo de vegetação ainda promove a

redução da radiação que chega à vegetação de estratos mais baixos e na superfície do solo, influenciando na taxa de evaporação e manutenção da umidade do solo. A maior proporção de estrato baixo observado no cenário F provocou um ligeiro aumento nas contribuições por escoamento superficial. Espécies de estratos baixos tendem a possuir raízes mais rasas, que favorecem o escoamento superficial.

A influência dos diferentes arranjos de SAFs sobre a contribuição para as vazões também foi discreta. Os cenários D e F, que possuem estruturas bastante semelhantes, permaneceram praticamente inalterados em relação ao *WYLD/PREC*, enquanto se observa uma ligeira redução entre os cenários D e E (1%) e aumento entre os cenários F e G (1%), que além de possuir maior percentual de vegetação de estrato baixo, possui o maior percentual de vegetação nativa.

Os

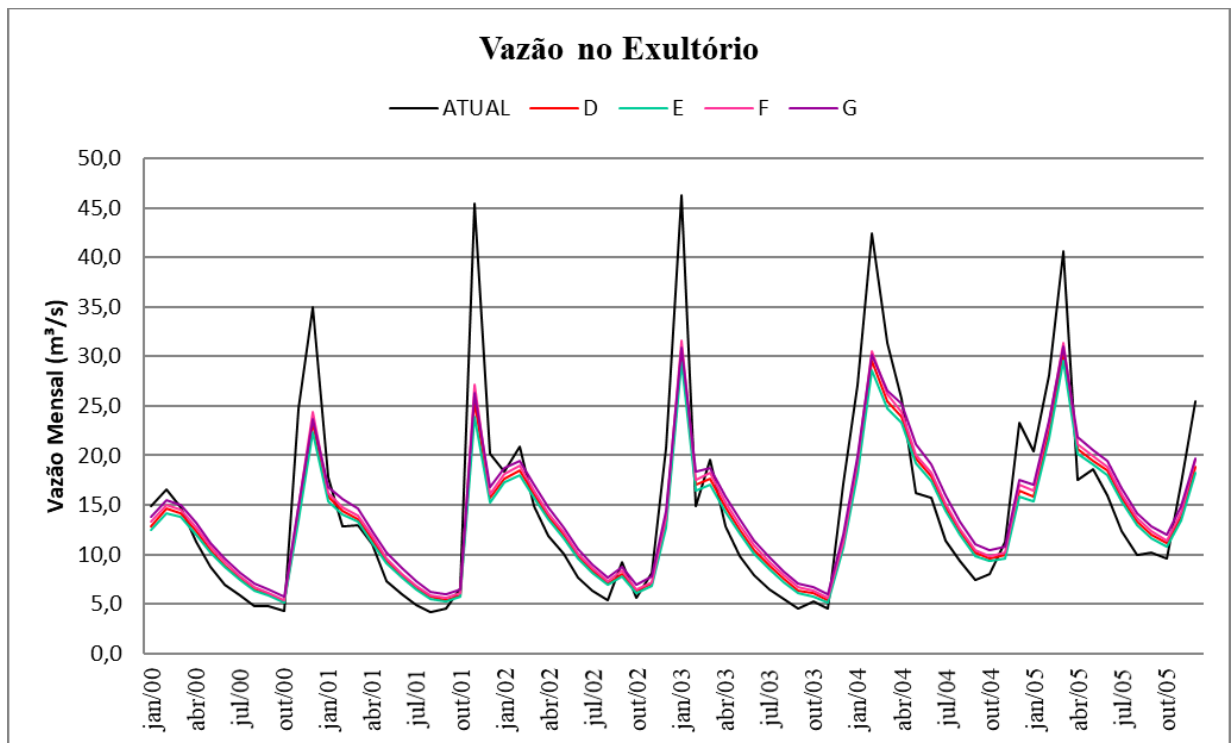
Gráfico

9

e

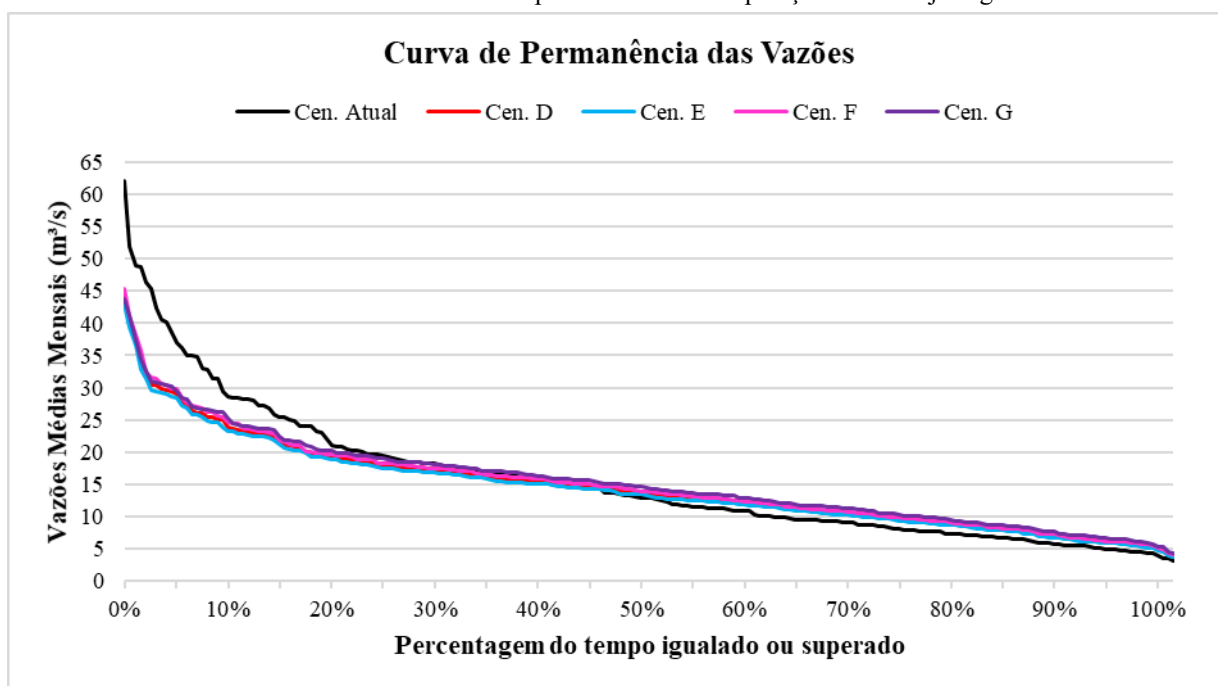
Gráfico 10 ilustram a situação descrita. Comparado ao cenário atual da bacia, todos os arranjos de sistemas propostos promovem redução significativa dos picos das vazões mensais, com mesmo comportamento hidrológico entre os períodos de cheias e estiagem. Entre os cenários, o E apresentou a redução mais perceptível em todo o período. Em contrapartida, o cenário G manteve os as vazões mensais em níveis pouco mais elevados que os demais, com um incremento de aproximadamente 1,6 m³/s na vazão de permanência em 90% do tempo.

Gráfico 9: Hidrograma dos cenários de diferentes arranjos de SAFs no período de 2000 a 2005. O período de 2000 a 2005 foi considerado neste gráfico apenas para que as alterações sejam visualmente mais perceptíveis, mas o período total de simulação foi de 1996 a 2012.



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 10: Curva de permanência das vazões médias mensais da RHCG, para o período total de simulação de 1996 a 2012. Comparativo entre o cenário atual de uso e ocupação do solo e os cenários de simulação de aumento da cobertura de SAFs em 42% para diferentes composições de arranjos agroflorestais.



Fonte: Autoria própria.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A vazão nos cursos d'água tem sido a variável mais considerada para avaliação dos recursos hídricos disponíveis para os usos múltiplos da água (BACELLAR, 2005; BESERRA, 2016; CECÍLIO; PIMENTEL; ZANETTI, 2019; DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015; GASSMAN; SADEGHI; SRINIVASAN, 2014). No entanto, neste estudo, uma questão relevante para a investigação realizada era se os SAFs proporcionariam alterações na disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica, que pudessem ser percebidas não só pelo comportamento das vazões nos rios, mas também pelas diferentes formas de disponibilização da água no ambiente, em uma abordagem de avaliação da condição hidrológica. Um acompanhamento desse processo pode oferecer elementos à visão holística de gestão integrada dos recursos hídricos, que integra a Política das Águas às Políticas do Território, Ambiental, Agropecuária, Florestal, entre outras (HERNÁNDEZ-MORCILLO et al., 2018). Por exemplo, o aumento da cobertura florestal pode reduzir o volume de escoamento superficial e as vazões de pico nos rios, mas também podem elevar as vazões mínimas e manter maior volume de água disponível na camada superior do solo para consumo das espécies vegetais incluídas.

O estudo demonstrou, por meio da simulação hidrológica, que a redução das contribuições para a vazão, devido ao estabelecimento de SAFs, foi produto de uma dinâmica da água desde a precipitação, que permitiu ampliar a capacidade de recarga de aquíferos rasos e profundos e aumentar o volume de água disponível para consumo pelas espécies de SAFs. Partindo das

respostas associadas aos diferentes componentes do balanço hídrico, foi possível avaliar que, embora a água não esteja completamente disponível nos cursos d'água, esta percorre caminhos que contribui para sua disponibilidade de forma mais regular no horizonte de tempo avaliado, devido ao aumento do fluxo de base, responsável por alimentar os cursos d'água em até 48%, em cenários de maior cobertura de SAFs. A redução do componente de escoamento superficial também gera benefícios do ponto de vista da gestão do território, uma vez que reduz os picos de enchentes, atenuando os processos de inundação que trazem prejuízos para as comunidades do entorno dos cursos d'água (BENINI, 2015; HERZOG; ROSA, 2010).

Deve-se considerar, ainda, que os serviços ecossistêmicos associados ao SAFs extrapolam a esfera hidrológica, propriamente dita (MICCOLIS et al., 2016). A adoção desse tipo de sistema está associada à melhoria das condições ambientais como um todo, avanços nos processos de ciclagem de nutrientes, redução de perdas por lixiviação, controle de erosão e aporte de sedimentos nos cursos d'água, aumento da biodiversidade e ampliação da perspectiva de renda para o produtor (ALVES, 2014; GUERRA, 2014; MWANGI et al., 2016). Portanto, os resultados aqui apresentados podem contribuir para o fortalecimento das políticas que promovem o reflorestamento e a conservação do território visando a promoção da qualidade ambiental. A perspectiva de adoção desses sistemas por aumento de cobertura do solo poderá auxiliar na elaboração de metas progressivas durante os processos de planejamento e avaliação de programas que visam ao aumento da cobertura florestal por SAFs, com vistas à melhoria da condição hidrológica.

A aplicação do modelo SWAT, apesar das suas limitações, permitiu que os processos hidrológicos associados aos SAFs fossem mais diretamente estudados, visto que os modelos comumente utilizados para a avaliação dos serviços ambientais dos SAFs não permitem uma abordagem mais detalhada sobre os componentes hidrológicos. A discretização dos SAFs em nível de HRU permite que seja preservado o critério de seleção de níveis de estratos na proposição dos arranjos, passando assim a ser incluídos como parâmetro de análise. Entretanto, o processo não permite o controle da distribuição dos SAFs na região hidrográfica simulada.

A possibilidade de composição de arranjos de SAFs é muito diversa, por variar conforme os estratos, espécies, disposição no território, funções ecológicas e/ou de produção. Isso sendo considerado, o modelo ainda apresenta algumas limitações na representação das agroflorestas, pois permanece a necessidade de um modelo que permita a simulação de sistemas em fileiras, ilhas, ou quintais florestais, por exemplo, que são de comum adoção, como apontado por Mwangi et al. (2016).

Outro aspecto importante a ser considerado na simulação dos SAFs seria as operações de manejo empregadas. O SWAT oferece uma gama de operações possíveis de serem simuladas (GLAVAN; PINTAR; URBANC, 2015; ULLRICH; VOLK, 2009). Entretanto, no âmbito deste estudo, não foi possível incluir operações comuns nesses sistemas, como a capina seletiva e a poda periódica. Nesse aspecto, considera-se importante estudos que consideram conhecimentos específicos sobre cultivos agrícolas e/ou agroflorestais, como etapas de crescimento, periodicidade de podas, entre outros.

4.5 CONCLUSÃO

Este estudo mostrou que as vazões médias mensais foram mantidas ao longo do tempo, de modo que as alterações nos processos hidrológicos provocados pelo aumento da cobertura florestal não seriam bem representadas apenas considerando a variável vazão. Deste modo, foram definidos indicadores que melhor representassem a condição hidrológica da bacia: $GW_Q/WYLD$ (contribuição do fluxo de base com a vazão), $LAT_Q/WYLD$ (contribuição do fluxo lateral com a vazão), $SUR_Q/WYLD$ (contribuição do escoamento superficial com a vazão), $WYLD/PREC$ (rendimento total sobre a precipitação incidente) e $PERC/PREC$ (percolação sobre a precipitação).

Com o uso dos indicadores, verificou-se que a condição hidrológica da bacia sofreu variações devido ao aumento da cobertura de SAFs, no sentido de aumento da disponibilidade hídrica na bacia. A dinâmica das águas subterrâneas foi alterada progressivamente, com o aumento de SAFs. A adoção desses sistemas produziu aumento da percolação da água no solo ($PERC/PREC$), com conseqüente incremento sobre o armazenamento de água nos aquíferos profundos e rasos, fato verificado pela elevação da contribuição do fluxo de base para as vazões nos cursos d'água ($GW_Q/WYLD$). Ao passo que se verificou a redução da contribuição do escoamento superficial para as vazões ($SUR_Q/WYLD$).

No que se refere às variações de arranjos de SAFs, os cenários avaliados não apresentaram resultados claros, que permitam uma conclusão precisa acerca dos efeitos sobre a condição hidrológica da região. Contudo, verificou-se que a introdução de sistemas com predominância de estratos altos e médios favorece o aumento da percolação da água no solo.

De modo geral, verificou-se que os SAFs contribuem para a melhoria da condição hidrológica de uma região hidrográfica, proporcionando maior retenção e potencial de aproveitamento da água precipitada, tendo em vista o favorecimento aos processos de percolação e produção de fluxo de base. Os cenários que apresentaram efeitos mais positivos sobre a condição hidrológica da região foram aqueles que tiveram 16 a 42% de aumento da área de cobertura pelos sistemas.

É importante destacar que os resultados obtidos são representativos da RHCG, e uma extrapolação dos resultados para outras regiões deve levar em consideração as semelhanças das características da região hidrográfica de referência. Além disso, os SAFs simulados são característicos de sistemas simples, e uma representação de sistemas mais complexos requer estudos complementares.

No entanto, considerando que os processos de calibração e validação foram realizados apenas para a vazão, é possível que tenham sido inseridas incertezas na avaliação das outras variáveis hidrológicas, utilizadas na composição dos indicadores.

5 RECOMENDAÇÕES

As avaliações realizadas no presente estudo tiveram por objetivo avaliar como melhor representar a condição hidrológica e avaliar como a adoção dos SAFs influência na disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas, buscando explorar respostas que pudessem dar subsídios a uma visão holística dos benefícios hidrológicos associados a esses sistemas. Entretanto, sobre a ótica da Gestão Integrada dos Recursos Hídricos, são ainda necessários estudos adicionais que explorem:

- Os efeitos da adoção de SAFs sobre a disponibilidade hídrica, considerando alternativas locais no território, com a simulação do impacto desses sistemas nas vertentes, zonas ripárias, áreas de preservação permanente, áreas degradadas;
- Os efeitos da adoção de SAFs sobre a disponibilidade hídrica em regiões que apresentem déficit hídrico;
- A dinâmica hidrossedimentológica associada à adoção de SAFs. Considerando que a adoção de sistemas agroflorestais contribui para redução do escoamento superficial, e, portanto, reduz os processos erosivos, associados à perda de solo e aporte de sedimentos;
- No que se refere à ferramenta utilizada e os processos de modelagem, recomenda-se a realização do processo de calibração e validação também para outros componentes que serão investigados, como evapotranspiração, fluxo de base, entre outros. Neste estudo, assumiu-se que a calibração e validação da vazão fosse aceitável para avaliação do comportamento de outras variáveis do modelo; contudo, sempre que possível, tendo dados observados, é importante que outras variáveis sejam também calibradas. Além disso, existem alguns ajustes que podem ser realizados no modelo SWAT para que represente melhor os processos de crescimento de planta, com melhores estimativas para a variável de evapotranspiração.
- Sugere-se, ainda, que sejam realizados estudos complementares para a avaliação das incertezas.

6 CONSIDERAÇÕES PARA O SINGREH

O desenvolvimento de estudos científicos na área de Gestão e Regulação de Recursos Hídricos é uma contribuição para o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGRH). A integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental faz parte das diretrizes gerais de ação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o Artigo “Avaliação da influência de sistemas agroflorestais sobre a condição hidrológica de bacias hidrográficas” se insere no contexto da integração de políticas de recursos hídricos e meio ambiente do estado do Espírito Santo. Institucionalmente, o Programa Reflorestar/ES, coordenado pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo (SEAMA), se utiliza do Pagamento por Serviços Ambientais, que possui relação com o instrumento de “compensação em recursos hídricos”, preconizado pela Política Estadual de Recursos Hídricos do Espírito Santo, muito embora esta conexão não esteja claramente estabelecida do quadro institucional das políticas a que se referem.

Atualmente, o Programa Reflorestar/ES atua na perspectiva de restauração das paisagens florestais e busca contribuir para a restauração do ciclo hidrológico de bacias hidrográficas pelo incentivo à conservação da mata nativa e em recuperação, reflorestamento e arranjos florestais que conciliam a prestação de serviços ecossistêmicos com a geração de renda para o produtor rural – sistemas agroflorestais. Entretanto, observa-se, por um lado, uma carência de estudos que investigam e quantificam os impactos de SAFs sobre os componentes do ciclo hidrológico das bacias hidrográficas e, por outro, a necessidade de difusão do conhecimento e percepção dos benefícios associados a estes sistemas, para que a restauração das paisagens florestais seja difundida no território.

Levando em conta essas observações, compreender os impactos de sistemas agroflorestais sobre a condição hidrológica é importante para o aperfeiçoamento da avaliação de desempenho de programas, como o Reflorestar/ES, como suporte às tomadas de decisões com rebatimento sobre a gestão dos recursos hídrico. O presente trabalho buscou avaliar a influência de SAFs sobre a condição hidrológica de bacias hidrográficas, por meio de indicadores obtidos a partir de variáveis do modelo SWAT, com vistas a ampliar o conhecimento acerca da adoção desses sistemas sobre os processos hidrológicos que ocorrem numa região.

Uma questão relevante para a investigação realizada neste estudo era se os SAFs proporcionariam alterações na disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica, que pudesse ser percebidas não só pelo comportamento das vazões nos cursos d’água, que tem sido a condição mais difundida para avaliação dos recursos hídricos disponíveis para os usos múltiplos da água (BACELLAR, 2005; BESERRA, 2016; CECÍLIO; PIMENTEL; ZANETTI, 2019; DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015; GASSMAN; SADEGHI; SRINIVASAN, 2014), mas também em uma abordagem de avaliação da condição hidrológica que considere as diferentes formas de disponibilização da água no ambiente. Um acompanhamento desse mecanismo pode oferecer elementos à visão holística de gestão integrada dos recursos hídricos, que integra a Política das Águas às Políticas do Território, Ambiental, Agropecuária, Florestal, entre outras (HERNÁNDEZ-MORCILLO et al., 2018).

Por exemplo, o aumento da cobertura florestal pode reduzir o volume de escoamento superficial e as vazões de pico nos rios, mas também podem elevar as vazões mínimas e manter maior volume de água disponível na camada superior do solo para consumo das espécies incluídas.

Entre as prioridades do Planejamento Estratégico do Espírito Santo estão a preservação e recuperação da água, em que foram definidos projetos como eixo de trabalho a ser desenvolvidos até 2022, como o Projeto de Integração do Programa Reflorestar/ES com áreas estratégicas para a proteção de reservatórios e aumento de recarga hídrica (AGERH, 2019). Diante do exposto, o presente estudo pode contribuir para a proposição de cenários de aumento da recarga hídrica, tendo em vista os resultados que demonstram elevação do índice de percolação da água subterrânea, com consequentes recargas de aquíferos rasos e profundos, em função do aumento da cobertura de SAFs no território. Além disso, a metodologia desenvolvida poderia ser utilizada para dar suporte à definição de áreas estratégicas de reflorestamento por SAFs, que potencialmente mais contribuiriam para as recargas hídricas.

As simulações realizadas demonstraram que a condição hidrológica de regiões que adotam os SAFs é semelhante a um reflorestamento comum apenas de espécies nativas. Contudo, a adoção de SAFs se mostra mais vantajosa, tendo em vista a premissa de produção agrícola e aumento de renda para o produtor rural. Sob essa visão, uma área reflorestada, também seria capaz de produzir benefícios socioeconômicos, além de hidrológicos e ambientais. O que pode ser considerado um potencializador no contexto da integração de outras políticas com a de Recursos Hídricos.

Além disso, o Programa Reflorestar já possui ações conjuntas com alguns CBHs do Espírito Santo. Deste modo, a ampliação do conhecimento acerca dos benefícios hidrológicos associados aos SAFs pode contribuir para os processos de planejamento dos recursos hídricos no Estado, dando mais embasamento técnico-científico aos projetos de restauração da cobertura vegetal propostos pelo Programa.

Deve-se considerar, ainda, que os serviços ecossistêmicos associados ao SAFs extrapolam a esfera hidrológica, propriamente dita (MICCOLIS et al., 2016). A adoção desse tipo de sistema está associada à melhoria das condições ambientais como um todo, avanços nos processos de ciclagem de nutrientes, redução de perdas por lixiviação, controle de erosão e aporte de sedimentos nos cursos d'água, aumento da biodiversidade e ampliação da perspectiva de renda para o produtor (ALVES, 2014; GUERRA, 2014; MWANGI et al., 2016).

Portanto, os resultados aqui apresentados podem contribuir para o fortalecimento das políticas que promovem o reflorestamento e a conservação do território visando à promoção da qualidade ambiental. A perspectiva de adoção desses sistemas por aumento de cobertura do solo poderá auxiliar na elaboração de metas progressivas durante os processos de planejamento e avaliação de programas que visam ao aumento da cobertura florestal por SAFs, com vistas à melhoria da condição hidrológica.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, Karim C. et al. 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.
- ABDO, M. T. V. N.; VALERI, S. V.; MARTINS, A. L. M. Sistemas Agroflorestais e Agricultura Familiar: Uma Parceria Interessante. **Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária**, 2008.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Portal Hidroweb**. 2018. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>>.
- ALVES, F. V. (Coordenação). **SAFs + 10 Sistemas Agroflorestais e Desenvolvimento Sustentável: 10 Anos de Pesquisa**. Brasília: Embrapa, 2014.
- AMADOR, D. B.; VIANA, V. M. Sistemas agroflorestais para recuperação de fragmentos florestais. **Série Técnica IPEF**, v. 12, p. 105–110, 1998.
- AMON-ARMAH, F. et al. Effect of nutrient management planning on crop yield, nitrate leaching and sediment loading in Thomas Brook watershed. **Environmental Management**, v. 52, n. 5, p. 1177–1191, 2013.
- ANTONELI, V.; THOMAZ, E. L. Comparação de infiltração de água no solo mensurada em período seco e úmido, em diferentes usos da terra na bacia do arroio Boa Vista, Guamiranga, Paraná. **Ambiência**, v. 5, n. 2, p. 301–317, 2009.
- ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assesment Part I: Model development. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**, v. 34, n. 1, p. 73–89, 1998.
- BACELLAR, L. DE A. P. O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas. **Geo.br**, v. 1, p. 1–39, 2005.
- BAKER, T. J.; MILLER, S. N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. **Journal of Hydrology**, v. 486, p. 100–111, 2013.
- BATISTA, Núbia Laís Fernandes. **Proposição de metodologia baseada em indicadores de qualidade do solo para sustentabilidade da produção agrícola**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.
- BAYER, Débora Missio. **Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala**. 2014. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- BENINI, Sandra Medina. **Infraestrutura verde como prática sustentável para subsidiar a elaboração de planos de drenagem urbana: Estudo de caso da cidade de Tupã/SP**. 2015.

Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2015.

BERTANI, Gabriel. **Influência da Expansão Agrícola no Escoamento Superficial e na produção de Sedimentos no Cerrado do Meio Norte do Mato Grosso**. 2014. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

BESERRA, Plácido Souza. **Avaliação dos Efeitos das alterações na Cobertura e uso do solo sobre o regime de vazões via Modelagem Hidrológica**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). 2016, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

CARAM, Rochane de Oliveira. **Mudanças no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia do rio Piracicaba**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

CARVALHO, F. H. DE. **Uso do Modelo Swat na Estimativa da Vazão e da Produção de Sedimentos em bacia agrícola do Cerrado Brasileiro**. 2014. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2014.

CASTRO, C. O. DE et al. Building Technology and Urban Development Water sustainability assessment for the region of Curitiba. **International Journal of Sustainable**, v. 8, n. 2, p. 184–194, 2009.

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

CHEN, J.; WU, Y. Advancing representation of hydrologic processes in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) through integration of the TOPographic MODEL (TOPMODEL) features. **Journal of Hydrology**, v. 420–421, p. 319–328, 2012.

CHEN, Y. et al. Hydrological responses of land use change from cotton (*Gossypium hirsutum* L.) to cellulosic bioenergy crops in the Southern High Plains of Texas, USA. **GCB Bioenergy**, v. 8, n. 5, p. 981–999, 2016.

CONCEIÇÃO, José Roberto. **Metodologia para identificação de áreas prioritárias para redução da erosão hídrica em bacias de mananciais de abastecimento público do Paraná: estudo de caso bacia do Passaúna**. 2014. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

CONSÓRCIO NIP & PROFILL. Relatório da Etapa A: Situação Atual e Tendencial - Regiões Hidrográficas Santa Maria da Vitória e Jucu. 2016.

DURIGAN, G.; TOREZA, J. (Organizer). **Linking Science and Practice for a Better World: Book of Abstracts [of the] VII World Conference on Ecological Restoration; V Congreso Ibero-Americano y del Caribe de Restauración Ecológica; I Conferência Brasileira de Restauração Ecológica**. Foz do Iguaçu, SER: 2017.

- FRANCESCONI, W. et al. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services: A systematic review. **Journal of Hydrology**, v. 535, p. 625–636, 2016.
- GAO, Y. et al. Development of representative indicators of hydrologic alteration. **Journal of Hydrology**, v. 374, n. 1–2, p. 136–147, 2009.
- GIGLIO, J. N.; KOBAYAMA, M. Interceptação da Chuva: Uma Revisão com Ênfase no Monitoramento em Florestas Brasileiras. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 297–317, 2013.
- GUERRA, Sara Carolina Soares. **Subsídio ao aprimoramento do manejo da irrigação de consórcios agroflorestais em situação de escassez hídrica**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal Do Espírito Santo, Vitória, 2014.
- HAYATI, D.; RANJBAR, Z.; KARAMI, E. Measuring Agricultural Sustainability. **Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture**, v. 5, p. 73–100, 2011.
- HERNÁNDEZ-MORCILLO, M. et al. Scanning agroforestry-based solutions for climate change mitigation and adaptation in Europe. **Environmental Science and Policy**, v. 80, n. November 2017, p. 44–52, 2018.
- HERZOG, Cecilia Polacow; ROSA, Lourdes Zunino. Infraestrutura verde: sustentabilidade e resiliência para a paisagem urbana. **Revista Labverde**, n. 1, p. 92-115, 2010.
- INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL (INCAPER). **Meteorologia**. 2016. Disponível em: <<https://meteorologia.incaper.es.gov.br>>.
- INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (IEMA). **Geobases**. 2007. Disponível em: <<https://geobases.es.gov.br>>.
- INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES – IJSN. 2011. **Mapas**. Disponível em: <<http://www.ijsn.es.gov.br/mapas/>>.
- IUCN; WRI (2014). **Guia sobre a Metodologia de Avaliação de Oportunidades de Restauração (ROAM): Avaliação de oportunidades de restauração de paisagens florestais em nível subnacional ou nacional**. Documento de trabalho (Edição-teste). Gland, Suíça: IUCN. 125 pp.
- KAUFFELDT, A. et al. Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level. **Environmental Modelling and Software**, v. 75, p. 68–76, 2016.
- KROEGER, T. et al. **Análise do Retorno do Investimento na Conservação de Bacias Hidrográficas: referencial teórico e estudo de caso do Projeto Produtor de Água do Rio Camboriú, Santa Catarina Brasil**. Santa Catarina: The Nature Conservancy, 2017.
- KROLL, C. N.; CROTEAU, K. E.; VOGEL, R. M. Hypothesis tests for hydrologic alteration. **Journal of Hydrology**, v. 530, p. 117–126, 2015.
- LEFF, E. Agroecologia e saber ambiental. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, v. 3, p. 16, 2002.

LIN, B. et al. Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model. **Ecological Indicators**, v. 58, p. 55–63, 2015.

LOPES, Nadia Hidemi Yano. **Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

LOTZ, T.; OPP, C.; HE, X. Factors of runoff generation in the Dongting Lake basin based on a SWAT model and implications of recent land cover change. **Quaternary International**, p. 1–9, 2017.

MARCHIORO, Eberval. **Modelagem hidrosedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: Subsídios à Aplicação de Práticas de Conservação de Água e Solo no Noroeste Fluminense**. 2008. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MEDRADO, M. J. S. **Sistemas Agroflorestais: aspectos básicos e indicações**. p. 269–312, 2000.

MICCOLIS, A. et al. **Restauração ecológica com Sistemas Agroflorestais: Como conciliar conservação com produção. Opções para Cerrado e Caatinga**. Brasília: Instituto Sociedade, População e Natureza – ISPN/Centro Internacional de Pesquisa Agorflorestal – ICRAF, 2016.

MONTALVÃO, Maria Tereza Leite. **Modelagem dos Serviços Hidroambientais Resultantes de Práticas Conservacionistas na bacia do Córrego Taquarta - DF**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Florestal), Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MOREIRA, Luana Lavagnoli. **Análise De Sensibilidade de Parâmetros e de desempenho do modelo Soil and Water Assessment Tools (Swat) na Estimativa de vazões médias em Bacias Hidrográficas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

MORIASI, D. N. et al. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MWANGI, H. M. et al. Modelling the impact of agroforestry on hydrology of Mara River Basin in East Africa. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 18, p. 3139–3155, 2016.

NEITSCH, S. et al. Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. **Texas Water Resources Institute**, p. 1–647, 2011.

NGUYEN, H. H. et al. Modelling the impacts of altered management practices, land use and climate changes on the water quality of the Millbrook catchment-reservoir system in South Australia. **Journal of Environmental Management**, v. 202, p. 1–11, 2017.

NOGUEIRA, M. L.; AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. Estudo da Dinâmica de Percolação da água no solo - Gouveia, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, 2012.

ONG, C. et al. Agroforestry: Hydrological Impacts. **Encyclopedia of Agriculture and Food Systems**, p. 244–252, 2014.

ÖZTÜRK, M.; COPTY, N. K.; SAYSEL, A. K. Modeling the impact of land use change on the hydrology of a rural watershed. **Journal of Hydrology**, v. 497, p. 97–109, 2013.

PAZ, A. R. et al. Análise de Sensibilidade da evapotranspiração anual calculada pelo modelo hidrológico MGB-IPH relativa ao parâmetro capacidade de armazenamento do solo. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - ABRH**, n. 19, p. 1–8, 2013.

PINTO, D. B. F. **Aplicação do Modelo Swat (Soil and Water Assessment Tool) na Simulação Hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2011.

RIBASKI, J.; MONTOYA, L. J.; RODIGHERI, H. R. Sistemas agroflorestais: aspectos ambientais e socioeconômicos. **Informe Agropecuário**, v. 22, n. 212, p. 61–67, 2001.

RODRIGUES, Dulce BB; GUPTA, Hoshin V.; MENDIONDO, Eduardo M. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security. **Water Resources Research**, v. 50, n. 9, p. 7187-7205, 2014.

RODRIGUES, E. L. et al. Aplicação do modelo SWAT na avaliação do consumo de água em áreas de florestas plantadas na bacia do rio Pará, Alto São Francisco, em Minas Gerais. **Sociedade & Natureza**, v. 27, n. 3, p. 485–500, 2015.

RODRIGUES, Evandro Luis. **Avaliação da produção de água (vazão), em função de alterações do uso e da implantação de florestas de eucalipto em larga escala na bacia do rio Pará - Alto São Francisco**. 2013. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

RUHOFF, A. L. et al. Validation of the global evapotranspiration algorithm (MOD 16) in two contrasting tropical land cover types. **Remote Sensing and Hydrology**, v. 352, n. December 2012, p. 128–131, 2012.

SAJIKUMAR, N.; REMYA, R. S. Impact of land cover and land use change on runoff characteristics. **Journal of Environmental Management**, v. 161, p. 460–468, 2015.

SANTOS, Mário Jorge Campos. **Avaliação Econômica de quatro modelos agroflorestais em áreas degradadas por pastagens na Amazônia Ocidental**. 2000. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

SANTOS, Rodrigo de Oliveira. **Avaliação da produção de sedimento na bacia hidrográfica do rio Potengi através do modelo SWAT**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

SARI, Vanessa; PAIVA, Eloiza Maria Cauduro Dias de PAIVA, João Batista Dias de. **Interceptação da chuva em diferentes formações florestais na região sul do Brasil**. RBRH [online]. 2016, vol.21, n.1, pp.65-79. ISSN 2318-0331. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p65-79>.

SCHMALZ, B. et al. Water-related ecosystem services in Western Siberian lowland basins—Analysing and mapping spatial and seasonal effects on regulating services based on ecohydrological modelling results. **Ecological Indicators**, v. 71, p. 55–65, 2016.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (Espírito Santo). **Avaliação das oportunidades da restauração de paisagens e florestas para o estado do Espírito Santo**, Brasil. 2017. 88 p.

SEIBERT, J.; MCDONNELL, J. J. Land-cover impacts on streamflow: a change-detection modelling approach that incorporates parameter uncertainty. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, n. 3, p. 316–332, 2010.

SILVA, A. H. et al. Atributos físicos do solo e escoamento superficial como indicadores de serviços ambientais. In: Parron, et al. (Editores Técnicos). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015.

SILVA, Luciana Roberto Sarmiento. **Análise de Incertezas e Avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de Bacias Hidrográficas**. 2010. Tese (Doutorado em Tecnologia ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

SOSSAI, M.F.; PLATAIS, G. H.; MACHADO JÚNIOR, J. A. F.; NOVELLI, F. Z.; BELOTI, T. Restauração de Paisagens Florestais no estado do Espírito Santo – Brasil: De projetos-piloto a Política Estadual de Restauração em larga escala. In: MORAES, M. A. (Org.). **Restauração de florestas e paisagens no Brasil**. Brasília: IUCN. Brasília, 2016, p 204-229.

SOUZA, Kaíse Barbosa. **Influência Do Uso E Ocupação Do Solo Na Vazão Da Bacia Do Rio Uruçuí-Preto, Piauí**. 2015. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Piauí, Bom Jesus, 2015.

SOUZA, N. S. et al. Caracterização hidrológica e influência da cobertura do solo nos parâmetros de vazão do Rio das Fêmeas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 453–462, 2017.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G.; JONES, C. A. Hydrologic modelling of the United States with the Soil and Water Assessment Tool. **International Journal of Water Resources Development**, v. 14, n. 3, p. 315–325, 1998.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G.; JONES, C. A. Hydrologic modelling of the United States with the Soil and Water Assessment Tool. **International Journal of Water Resources Development**, v. 14, n. 3, p. 315–325, 1998.

TALLIS, Heather. **Natural capital: theory and practice of mapping ecosystem services**. Oxford University Press, 2011.

TÔSO, S. G. et al. **A utilização do MIMES – Multi-Escale Integrated Model of the Earth Systems Ecological Services como ferramenta importante para valoração de Serviços Ecosistêmicos.** 2008.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto Das Mudanças Da Cobertura Vegetal No Escoamento: Revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, p. 135–152, 1997.

ULLRICH, A.; VOLK, M. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 8, p. 1207–1217, 2009.

VILLA, F. et al. ARIES (Artificial Intelligence for Ecosystem Services): a new tool for ecosystem services assessment, planning, and valuation. **Aries**, p. 1–10, 2009.

VOGL, A. L. et al. Valuing investments in sustainable land management in the Upper Tana River basin, Kenya. **Journal of Environmental Management**, v. 195, p. 78–91, 2017.

YANG, Q.; ZHANG, X. Improving SWAT for simulating water and carbon fluxes of forest ecosystems. **Science of the Total Environment**, v. 569–570, p. 1478–1488, 2016.

ZHANG, L.; ZHAO, F. F.; BROWN, A. E. Predicting effects of plantation expansion on streamflow regime for catchments in Australia. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 7, p. 2109–2121, 2012.

ZHANG, M. et al. A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime. **Journal of Hydrology**, v. 546, p. 44–59, 2017.