

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE  
SISTEMAS AMBIENTAIS

Hugo Henrique Cardoso de Salis

**MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO  
CÓRREGO MARINHEIRO, SETE LAGOAS – MG**

Belo Horizonte

2018

Hugo Henrique Cardoso de Salis

**MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO  
CÓRREGO MARINHEIRO, SETE LAGOAS - MG**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Adriana Monteiro da Costa

Co-orientador: Dr. João Herbert Moreira Viana

Belo Horizonte,  
Instituto de Geociências da UFMG

2018

Salis, Hugo Henrique Cardoso de.

166m Modelagem hidrológica para a bacia hidrográfica do Córrego  
Marinheiro, Sete Lagoas -MG [manuscrito] / Hugo Henrique  
Cardoso de Salis. – 2018.

018 ix, 42 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientadora: Adriana Monteiro da Costa.

Coorientador: João Herbert Moreira Viana.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas  
Gerais, Departamento de Cartografia, 2018.

Bibliografia: f. 39-42.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2.  
Recursos hídricos – Desenvolvimento – Sete Lagoas (MG) – Teses.  
3. Bacias hidrográficas – Sete Lagoas (MG) – Teses. I. Costa,  
Adriana Monteiro da. II. Viana, João Herbert Moreira. Universidade  
Federal de Minas Gerais. Departamento de Cartografia. IV. Título.

CDU:

911.2:519.6(815.1)




## FOLHA DE APROVAÇÃO

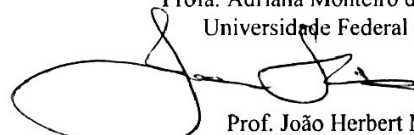
MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO  
MARINHEIRO, SETE LAGOAS – MG

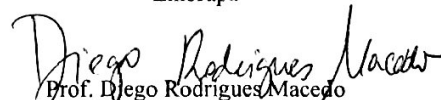
### HUGO HENRIQUE CARDOSO DE SALIS


Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS.

Aprovada em 30 de maio de 2018, pela banca constituída pelos membros:

  
Prof. Adriana Monteiro da Costa - Orientador  
Universidade Federal de Minas Gerais

  
Prof. João Herbert Moreira Viana  
Embrapa

  
Prof. Diego Rodrigues Macedo  
UFMG

  
Prof. Azeneth Eufrausino Schuler  
Embrapa Solos

Belo Horizonte, 30 de maio de 2018.

Ao meu Tio e Amigo Ivo Barbosa

*In memoriam*

iv

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pela LUZ, VIDA e AMOR. Por inspirar meus esforços e meus trabalhos, por guiar meus passos e por me proteger.

É uma grande satisfação poder chegar a esse momento e reconhecer a contribuição e o generoso apoio de um grande número de pessoas que me ajudaram durante esse processo de obtenção de título de Mestre.

Em especial, quero expressar minha gratidão à professora Dr<sup>a</sup>. Adriana Monteiro que me ofereceu essa oportunidade e todo o apoio necessário para atuar como acadêmico e realizar pesquisas e trabalhos relacionados ao meio ambiente. Sou grato por todo o conhecimento que me foi proporcionado durante todos esses meses e pela oportunidade de trabalhar no Laboratório de Solos e Meio Ambiente do Instituto de Geociências da UFMG, lugar no qual obtive um amadurecimento e crescimento pessoal imensurável.

Quero agradecer ao meu co-orientador, Dr. João Herbert, da EMBRAPA Milho e Sorgo, pelo contínuo apoio e orientação, sempre demonstrando um conhecimento refinado, além de ser solidário e disponível para tirar dúvidas e discutir sobre os mais diversos temas da ciência.

Agradeço a Marysol, EMBRAPA Solos, a quem considero como uma segunda co-orientadora e amiga, por acreditar nesse projeto e por me oferecer um especial suporte e apoio durante boa parte do desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço a Annika Künne, à Juliana Santos e ao Sven Kralisch, da Universidade de Jena – Alemanha, pela amizade formada e pela ajuda nos trabalhos, sempre me instruindo com prontidão e competência a utilizar o JAMS.

Agradeço ao professor Dr. Wilson, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos (EHR-UFMG), por gentilmente me receber em sua sala para tirar dúvidas, além de me lembrar e ensinar muitas questões importantes sobre Recursos Hídricos.

Particularmente, gostaria de agradecer a todos os colegas do Laboratório de Solos e Meio Ambiente pelos auxílios, participações e aprimoramento de análises e discussões sobre questões ambientais e pelo comportamento acolhedor, gentil e amigável no qual sempre me tratam.

Aos colegas de Pós-graduação pela amizade e por sempre compartilhar seus conhecimentos.

Também agradeço, em especial, ao professor Timbó, professor Britaldo, professor Raoni, professor Ricardo e professor Rodrigo pela participação em minha formação e pela partilha de seus conhecimentos nas disciplinas, bem como pela cortesia dentro e fora de sala de aula.

Agradeço à Pâmela e a Cora pela cordialidade, educação e simpatia ao me receber na secretaria da Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais para tratar dos assuntos burocráticos da matrícula e do curso.

Também quero externar minha gratidão a três pessoas especiais que estão sempre ao meu lado. Minha mãe, que me apoiou na mudança de Salinas e sempre me incentiva a seguir meus sonhos. À minha irmã Daiane, por me receber em Belo Horizonte e pela constante ajuda. À minha irmã Danielle, pelo constante carinho, apoio e encorajamento para alcançar meus objetivos.

Agradeço aos demais membros de minha família e aos meus amigos pela boa convivência e pelo inestimável estímulo a ser sempre uma pessoa melhor.

Agradeço mais uma vez a cada um de vocês. Saibam que eu não teria chegado até aqui se não fossem pelos seus valiosos incentivos.

## RESUMO GERAL

No âmbito de bacias hidrográficas, há sempre a necessidade de informações confiáveis, precisas e de baixo custo para subsidiar os planejamentos e tomadas de decisões. Gestores, pesquisadores, ambientalistas e demais atores estão sempre procurando reunir dados precisos e confiáveis acerca de determinadas bacias, principalmente, as que estão sob pressões antrópicas. A bacia do Córrego Marinheiro, localizada em Sete Lagoas, MG é uma das poucas fontes de água superficial do município. Sua importância ecológica está baseada em inúmeros fatores, como por exemplo, o fato estar inserida em uma região geológica cárstica, caracterizada pela presença de rochas carbonáticas que, por sua vez, favorecem a formação de cavernas e sumidouros. Abriga uma espécie arbórea presente na lista de espécies criticamente ameaçadas de extinção, a *Dimorphandra wilsonii* Rizzini (Faveiro de Wilson), bem como representa uma importante fonte de captação de água para sistemas de irrigação instalados na região. No entanto, nos últimos anos, a bacia vem sofrendo com os impactos da expansão urbana e, principalmente, da escassez de chuvas e, apesar de toda sua relevância, a área não possui um monitoramento hidrológico adequado. Neste contexto, este trabalho teve por objetivo realizara modelagem hidrológica para a bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG. A metodologia foi baseada na validação e calibração de um modelo hidrológico para uma área de contribuição na bacia hidrográfica do Ribeirão Jequitibá que possui série histórica de vazões, e da qual a bacia do Marinheiro é afluente. A partir dos parâmetros calibrados e validados, extrapolou-se os resultados para a bacia do Córrego Marinheiro, o que permitiu gerar uma série histórica de vazões sintéticas entre os anos de 2003 a 2016. Todos os procedimentos citados foram feitos no sistema de modelagem hidrológica JAMS J2000. Observou-se um bom desempenho do modelo em simular as vazões máximas, médias e mínimas da área de contribuição. Além disso, concluiu-se que há uma possível superestimação da vazão média de longa duração ( $Q_{mld}$ ) adotada pelo Estado, na gestão dos seus recursos hídricos, com base na  $Q_{mld}$  modelada para a bacia hidrográfica do córrego Marinheiro.

Palavras-chave: Recursos hídricos, modelagem ambiental, JAMS J2000, curva-chave, regionalização de vazões.



## GENERAL ABSTRACT

Accurate reliable and low-cost information is necessary to support planning and decision-making of watersheds. The watershed of Marinheiro Creek, located in Sete Lagoas - MG (Brazil), is one of the few surface water sources of the municipality. Its ecological importance is based on many factors, such as the fact that it is inserted in a karstic geological region, characterized by the presence of carbonate rocks that, in turn, favor the formation of caves and sinks. In addition, there is one tree species on the list of critically endangered species, *Dimorphandra wilsonii* Rizzini (Faveiro de Wilson), as well as it is an important source of water for irrigation systems in the region. However, in recent years, it is suffering the effects of urban expansion and rainfall reduction, and though its relevance, there is no adequate hydrological monitoring system. This work aimed to develop a hydrological model for the hydrographic region of Marinheiro Creek. The methodology was based on the validation and on the calibration of a hydrological model for an area of analysis of the river basin of Jequitibá river which has a series of flow rate measurements, being the Marinheiro creek one of its tributaries. The calibrated and validated data were extrapolated to the Marinheiro Creek basin, to generate a series of synthetic flow rate data for the years of 2003 to 2016. All the mentioned procedures were done in the software JAMS J2000. The model was able to adequately simulate the average, mean and minimum flow rates of the contribution area. It was observed that is possible that the long term average flow rate ( $Q_{mld}$ ) adopted by the State for the water management is overestimated, based on the  $Q_{mld}$  modeled for the Marinheiro Creek.

Key words: Water resources, environmental modeling, JAMS J2000, head-discharge curve, regionalization of flows.

## Sumário

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>RESUMO GERAL</b> .....	vii
<b>GENERAL ABSTRACT</b> .....	viii
<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	1
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	4
<b>CAPITULO 1</b> .....	5
<b>Calibração e validação de modelo hidrológico para uma área sob influência carstica em Minas Gerais</b> .....	5
<b>1.INTRODUÇÃO</b> .....	5
<b>2.MATERIAIS E MÉTODO</b> .....	7
<b>3.RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	14
<b>4.CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	20
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	21
<b>5.REFERÊNCIAS</b> .....	21
<b>CAPITULO 2</b> .....	25
<b>Modelagem e caracterização de vazões da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG</b> .....	25
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	25
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	27
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	32
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	38
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	39
<b>5. REFERENCIAS</b> .....	39
<b>CONCLUSÃO GERAL</b> .....	42

## INTRODUÇÃO GERAL

Conhecer o regime hídrico de determinada área é de fundamental importância para evitar os conflitos pelo uso da água e, garantir a ecologia fluvial em longo prazo. Esse conhecimento deve se iniciar pela obtenção de informações precisas, principalmente sobre a sazonalidade e as vazões dos cursos d'água. São neles que se manifestam os primeiros reflexos dos impactos das mudanças climáticas e antrópicas nas bacias hidrográficas (NUNES et al., 2011).

No Brasil, apesar de toda a sua importância, o monitoramento dos cursos d'água não atende à demanda dos gestores e dos pesquisadores deste tema. Por esse motivo, a modelagem hidrológica possui um importante papel na geração de dados específicos que podem nortear programas de conscientização, planejamento e tomada de ações voltadas para proteção dos recursos hídricos. Dentre as vantagens da utilização deste método, pode-se citar, por exemplo, a economia, por não necessitar de instrumentos automáticos de monitoramento remoto, bem como as questões logísticas relacionadas ao acesso ao local, à instalação do equipamento e às visitas periódicas para manutenções (REBOUÇAS, 2015).

Por outro lado, dentre as desvantagens, pode-se considerar o fato da representação do sistema hidrológico por meio de equações empíricas poder apresentar generalizações ambientais não aplicáveis em determinadas realidades de bacias hidrográficas (NEPAL, 2014). Diante dessas questões, inúmeras iniciativas vêm sendo tomadas no sentido de desenvolver sistemas computacionais com performances cada vez mais precisas em termos de modelagem dos sistemas ambientais (ARNOLD et al., 1998; RODRIGES e SOARES-FILHO, 2007; KRAUSE, 2002).

É importante ressaltar que dentre os inúmeros modelos hidrológicos, existem classificações que os agrupam em diferentes tipos, como o de acordo com a especificidade de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos) (MOREIRA, 2005).

Dentre as iniciativas existentes, pode-se citar a plataforma JAMS (*Jena Adaptable Modelling System*), uma estrutura em software originalmente desenvolvida para modelagem eco-hidrológica. Os módulos presentes na sua plataforma são denominados como J2000 e permitem aplicações voltadas para modelagem de processos como os de transporte de

nutrientes, processos erosivos, processos hidrológicos, entre outros (KRAUSE, 2001; KRAUSE, 2002).

Devido à necessidade de obtenções de respostas espacialmente distribuídas e, devido ao comportamento aleatório das variáveis ambientais da área de estudo, adotou-se o sistema de modelagem hidrológica (JAMS J2000), que oferece uma abordagem para estimativa física do balanço hídrico de bacias hidrográficas (KRAUSE E KRALISCH, 2005). Vem sendo utilizada em inúmeras áreas e por diversos autores (NEPAL et al., 2014; KÜNNE, 2016; MACHADO et al., 2017).

Em relação à estrutura conceitual, o JAMS J2000 estima quatro componentes de escoamento de acordo com sua origem específica: a) escoamento direto (ou escoamento superficial); b) escoamento subsuperficial (interfluxo); c) escoamento subterrâneo superior (referente ao aquífero raso ou livre); e d) escoamento subterrâneo inferior (referente ao aquífero profundo ou confinado) que, por sua vez, apresenta menor dinâmica do que o escoamento subterrâneo inferior devido ao fato de ser mais lento por ocorrer preferencialmente entre fraturas de rochas maciças (KRAUSE, 2002).

A água drenada dos macroporos (LPSout) do solo é dividida em dois processos, a percolação (escoamento vertical) e o interfluxo (escoamento lateral) que serão determinados conforme a declividade do terreno e de um coeficiente calibrável (“soilLatVertLPS”), os quais podem ser representados conforme as equações 1 e 2 abaixo:

$$(1) \text{Percolação} = \text{LPSout} [1 - \tan(\text{decliv}) \times \text{soilLatVertLPS}] \text{ (emmm)}$$

$$(2) \text{Interfluxo} = 1 - \text{percolação(em mm)}$$

No processo de percolação sua divisão entre os aquíferos superior e inferior depende da declividade do terreno e de outro parâmetro calibrável (“gwRG1RG2dist”). Após completado o processo de escoamento, utiliza-se a abordagem da onda cinemática e a equação de Manning-Strickler para o cálculo da velocidade de fluxo de cada curso d’água (KRAUSE, 2002).

Destaca-se que, para realizar a modelagem hidrológica no JAMS J2000, utiliza-se como dados de entrada as séries históricas de clima (precipitação, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, entre outros), além de séries históricas de vazão, dados espaciais de classes de solos, de uso e cobertura do solo, de relevo e de geologia. Devido a

essa variedade de dados de entrada, o modelo é ferramenta viável para a modelagem de diversos cenários de bacias hidrográficas, como a do Córrego Marinheiro.

A bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro está localizada no município de Sete Lagoas, Minas Gerais. Ela é confluenta do Ribeirão Jequitibá que, por sua vez, está nos domínios da bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Todas essas bacias encontram-se em situação de vulnerabilidade ambiental pelo fato de estarem inseridas em uma região populosa do Estado, sujeita às atividades agropecuárias e industriais presentes em seu território (TRINDADE et al., 2017).

Além da relevância geográfica, a bacia do Córrego Marinheiro está inserida em uma região cárstica, caracterizada pela presença de rochas carbonáticas que favorecem a formação de cavernas. É uma das poucas fontes de água superficial de qualidade do município, cuja função ecológica pode estar comprometida pelas questões levantadas. Apesar disso, a bacia carece de mais estudos e monitoramento hidrológicos, que norteiem e avaliem a viabilidade ambiental do desenvolvimento e implantação de atividades no local.

A modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiros e torna um passo inicial fundamental, para posterior avaliação e análise de cenários ambientais decorrentes de ações humanas. Devido à falta de monitoramento na bacia hidrográfica, o primeiro passo foi realizar uma calibração e validação de um modelo hidrológico para uma área de contribuição, na bacia hidrográfica do Ribeirão Jequitibá, com dados fluviométricos da Agência Nacional de Águas (ANA) e o segundo passo foi transferir as calibrações do primeiro modelo hidrológico para modelar e caracterizar as vazões do Córrego Marinheiro, durante o período de 2003 e 2016.

Os resultados indicaram a possibilidade da transferência das parametrizações do modelo aplicado à área de contribuição para a bacia do Córrego Marinheiro, permitindo avaliar seu desempenho para estimar o fluxo de base, mesmo com poucas medições disponíveis de vazão neste curso d'água.

Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo principal apresentar os procedimentos adotados na modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG.

## REFERÊNCIAS

MOREIRA, I. A. Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros. 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

NEPAL, S.; FLÜGEL, W-A.; SHRESTHA, A. B. Upstream-downstream linkages of hydrological processes in the Himalayan region. **Ecological Processes**, v. 3, n. 1, p. 19, 2014.

NUNES, R. T. S; FREITAS, M. A.; ROSA, L. P. Vulnerabilidade dos recursos hídricos no âmbito regional e urbano. **Rio de Janeiro: Interciência**, 212p, 2011.

KRAUSE, P. Das hydrologische Modellsystem J2000: **Beschreibung und Anwendung in großen Flußgebieten**. Forschungszentrum Jülich, Zentralbibliothek, 2001.

KRAUSE, P. Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the J2000 model. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 27, n. 9-10, p. 663-673, 2002.

REBOUÇAS, A. **Uso inteligente da água**. Escrituras Editora e Distribuidora de Livros Ltda., 206p, 2015.

RODRIGUES, H. O.; SOARES-FILHO, B. S.; COSTA, WL de S. Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 13, p. 3089-3096, 2007.

TRINDADE, A. L. C.; ALMEIDA, K. C. D. B.; BARBOSA, P. E.; OLIVEIRA, S. M. A. C. Tendências temporais e espaciais da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do Rio das Velhas, Estado de Minas Gerais. **Eng. Sanit. Ambient**, p. 13-24, 2017.

# CAPITULO 1

## **Calibração e validação de modelo hidrológico para uma área cárstica em Minas Gerais**

Resumo: As regiões cársticas são predominantemente formadas por rochas carbonáticas, como o calcário e a dolomita, cujo contato durante longo período de tempo com a água contribui para a formação de cavernas. Com a mudança no regime pluviométrico e com o aumento da demanda por recursos hídricos, a pressão sobre essas áreas torna-se cada vez maior, evidenciando a necessidade de compreensão de seus processos hidrológicos no tempo e no espaço. O objetivo deste trabalho foi realizar a calibração e validação de um modelo hidrológico para uma área cárstica em Minas Gerais. A metodologia foi desenvolvida em 5 etapas principais: i) Pré-processamento dos dados climáticos e fluviométricos; ii) Mapeamento do uso e cobertura do solo; iii) Delineamento das unidades de resposta hidrológicamente homogêneas da área; iv) Parametrização dos dados de entrada; v) Calibração automática e validação do modelo hidrológico. Os resultados indicaram a viabilidade de transposição para outras áreas com características físicas semelhantes, além de sugerir o escoamento direto, como o dominante entre os meses chuvosos de outubro a janeiro e em março, respondendo por 36% do fluxo de água durante o ano hidrológico. O escoamento subsuperficial respondeu por 35%, e predomina entre os meses de fevereiro e de abril a agosto. Os escoamentos subterrâneos ESUBsup e ESUBinf, somados, responderam por 28,3% do escoamento na área. Concluiu-se que a modelagem realizada pode ser utilizada na tomada de ação e planejamento voltados para a proteção e recuperação ambiental nas áreas de recarga que estejam sob uso e cobertura que impermeabilizam a área.

Palavras-chave: Recursos hídricos, modelagem ambiental, JAMS J2000

## **1. INTRODUÇÃO**

As regiões cársticas são predominantemente formadas por rochas carbonáticas, como o calcário e a dolomita, cujo contato com água durante longo período de tempo resulta na formação de cavernas. Estima-se que de 3 a 6% do território nacional é coberto por essas áreas e no Estado de Minas Gerais esse percentual é de cerca de 22%. Esses locais são

passíveis de serem explorados devido à suas fontes subterrâneas de água potável para a população (AULER et al., 2005; HARTMANN, 2014).

Com a mudança no regime pluviométrico e com o aumento da demanda por recursos hídricos, a pressão sobre essas áreas torna-se cada vez maior, evidenciando a necessidade de compreensão de seus processos hidrológicos no tempo e no espaço. Trata-se de uma tarefa complexa, devido à heterogeneidade do movimento da água na superfície e na subsuperfície dos sistemas cársticos. Apesar da dificuldade, inúmeros pesquisadores vêm lançando mão de modelos hidrológicos para simular a hidrodinâmica desses ambientes (KINZELBACH, 1986; WADA et al., 2010; KOVAC e SAUTER, 2014).

Os modelos hidrológicos são ferramentas que realizam a representação matemática dos processos do ciclo hidrológico como, por exemplo, a infiltração da água no solo, a recarga de aquíferos, o escoamento superficial e a vazão na rede de drenagem. Eles podem ser utilizados para suprir e/ou complementar informações de determinado local, de forma representativa e mais próxima possível da dinâmica hídrica real de uma bacia hidrográfica. Dos inúmeros modelos existentes, destacam-se o *Topography Based Hydrological Model* (BEVEN E KIRKBY, 1979); SHE - Sistema Hidrológico Europeu (ABBOTT, et. al., 1986); SWAT – Soil and Water Assessment Tool (ARNOLD et al., 1998); o MGB – IPH – Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (COLLISCHONN e TUCCI, 2001); o THMB – *Terrestrial Hydrologic Model with Biogeochemistry* (COE et. al., 2008), entre outros.

Além dos modelos citados, pode-se destacar o *framework* JAMS J2000, um modelo hidrológico orientado a processos que apresenta módulos de regionalização de dados climáticos, de balanço volumétrico de águas no solo, de balanço volumétrico de águas subterrâneas e de propagação dos escoamentos nos cursos d'água. Vários autores o utilizaram para simular diversos tipos de ambientes, destacando sua adaptabilidade na representação hidrológica de diferentes bacias hidrográficas e em ambientes tão complexos como os de áreas cársticas (KRAUSE, 2002; NEPAL et al., 2014; KÜNNE, et al., 2016; MACHADO et al., 2017).

Apesar de sua importância, a aplicação de modelos hidrológicos para fornecer uma visão geral da relevância das regiões cársticas e avaliar o grau de vulnerabilidade, ainda é pouco comum no território mineiro. Essas informações podem subsidiar planejamentos que evitem a super exploração e possíveis impactos advindos de atividades antrópicas sobre os recursos hídricos, permitindo mensurar e espacializar a dinâmica de vários processos hidrológicos do local de forma rápida e com baixo custo.

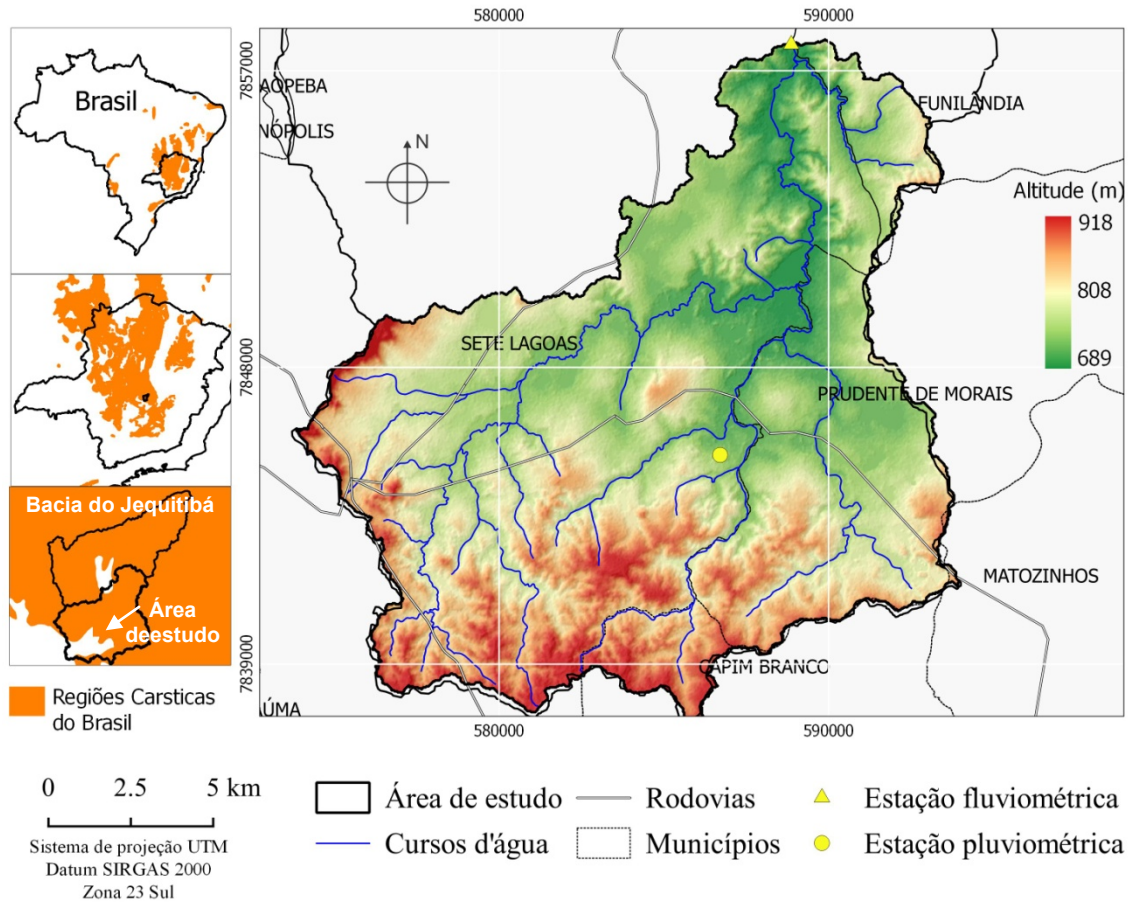


Nesse sentido objetivou-se realizar a calibração e a validação de um modelo hidrológico para uma área cárstica em Minas Gerais.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

A área de estudo localiza-se na região central de Minas Gerais e está presente em porções dos municípios de Capim Branco, Funilândia, Prudente de Moraes e Sete Lagoas, entre as coordenadas planas de 573198 a 594872 de longitude Oeste e 7859607 a 7836875 de latitude Sul, Datum geodésico SIRGAS 2000 e projeção UTM 23 sul. A área possui 24.000 ha e, fisionalmente, está inserida entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado, com presença de fitofisionomias como Floresta Estacional Semidecidual e Campo cerrado. O clima da região, segundo classificação de Koppen, é o subtropical (Cwa), caracterizado por apresentar inverno seco e verão quente. A região tem predomínio de áreas cársticas pertencentes ao Grupo Bambuí, com formações litológicas dos tipos Calcário, Argilito, Siltito, Ortognaisse bandado, além de Sedimentos clásticos e lateríticos ferruginosos (CPRM, 2010) (Figura 1).

Figura 1 - Localização da área de estudo.



A base cartográfica utilizada consistiu em: a) Mapa de solos de Minas Gerais, com escala de 1:650.000 (UFV et al., 2010); b) Mapa de geologia de Minas Gerais, com escala de 1:1.000.000 (CODEMIG/CPRM, 2014); c) Modelo Digital de Elevação ALOS PALSAR, com resolução espacial de 12,5 m (JAXA/METI, 2010); e d) Imagem do satélite Sentinel – 2, com resolução espacial de 10 m (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Além da base cartográfica, foram utilizados dados climáticos de estações pluviométricas dos municípios de Belo Horizonte, Sete Lagoas, Florestal e Conceição do Mato Dentro e dados da estação fluviométrica do município de Funilândia (nº 41440005) (INMET, 2017; ANA, 2017). Também, foram utilizados os softwares livres Hydrus 1D (ŠIMŮNEK et al., 2008) Quantum GIS e SPRING (versão 4.3.5), bem como o *framework* JAMS J2000 (KRAUSE, 2001; KRALISCH et al., 2007) e cuja forma utilização pode ser consultada em: [http://jams.uni-jena.de/ilmswiki/pt/index.php/Usando\\_o\\_modelo\\_J2000](http://jams.uni-jena.de/ilmswiki/pt/index.php/Usando_o_modelo_J2000).

A metodologia foi desenvolvida em 5 etapas principais: i) Pré-processamento dos dados climáticos e fluviométricos; ii) Mapeamento do uso e cobertura do solo; iii) Delineamento das unidades de resposta hidrológicamente homogêneas da área; iv) Parametrização dos dados de entrada; v) Calibração automática e validação do modelo hidrológico, tomando como período completo dos dados os anos de 2003 a 2016.

Assim, na primeira etapa, de pré-processamento dos dados climáticos e fluviométricos, foram organizadas as variáveis precipitação, temperatura, umidade relativa, horas de insolação, velocidade do vento, bem como os dados de vazões diárias, em planilhas que, por sua vez, foram submetidas à plataforma *online* INTECRAL RBIS para conversão em arquivos no formato específico aceito pelo JAMS J2000.

Na segunda etapa, de mapeamento do uso e cobertura do solo, foram pré-processadas as imagens por meio de recorte para a área de estudo e, verificada as consistências radiométrica, geométrica e geográfica das cenas. Logo após, realizou-se a fotointerpretação das imagens e a classificação por meio do método de classificações por regiões. Nessa etapa, foi possível mapear as classes de uso e cobertura do solo do tipo área cultivada, área urbana, campo cerrado, corpos hídricos, floresta, pastagem, solo exposto e vegetação herbácea.

Na terceira etapa, de delineamento das unidades de resposta hidrológicamente homogêneas (URH), utilizou-se a plataforma *online* HRU-WEB, onde os mapas de solos, geologia, modelo digital de elevação e o mapa de uso e cobertura do solo foram integrados para determinar as conexões entre os fluxos hidrológicos da área, por meio de unidades topologicamente homogêneas. Assim, cada URH apresentou um determinado número de identificação, coordenadas do seu centróide, elevação média, área, declividade média, tipo de solo, geologia, e cobertura do solo, bem como sua conexão a uma URH adjacente ou a uma parte específica de curso d'água.

Na quarta etapa, de parametrização dos dados de entrada, foram realizadas pesquisas bibliográficas e consultas a trabalhos técnicos realizados na área para determinar as propriedades físicas de cada classe dos dados de entrada de cobertura do solo (Tabela 1), classes de solos e litologias.

Tabela 1- Parametrização das classes de uso e cobertura do solo

Classe de uso e cobertura do solo	Albedo (%)	Resistência superficial (s/m)	IAF (adimensional)	Crescimento efetivo (m)	Profundidade da raiz (dm)
Área cultivada	20,0	70,0	0,6	1,1	2,0
Área urbanizada	16,4	70,0	0,01	0,0	0,0
Cerrado	14,2	70,0	0,8	20,0	12,0
Corpos hídricos	4,0	70,0	0,0	0,0	0,0
Floresta	15,0	70,0	0,9	30,0	30,0
Solo exposto	20,0	70,0	0,0	0,0	0,0
Referências	Braga et al. (2017); Giongo e Vettorazzi (2014)	FAO (1998)	Ribeiro et al. (2016)	Scolforo et al. (2008)	FAO (1998)

As classes de solos foram parametrizadas quanto à sua profundidade efetiva, ao coeficiente de permeabilidade, à capacidade de ar e à capacidade de campo. Todos os valores foram estimados com base em modelagem no software Hydrus 1D e verificados com base na literatura (Tabela 2).

Tabela 2 - Parametrização das classes de solos

Classe de solos	Profundidade (cm)	Coefficiente de permeabilidade mínima (mm/d)	Capacidade de ar (mm)	Capacidade de campo (mm)
Argissolo Vermelho Amarelo	170	1	40	600
Cambissolos Hápicos	230	1	37	1150
Latossolos Vermelho-Amarelos	250	1	38	1500
Neossolo Litólico	50	1	13	125
Fonte:	Hydrus 1D			

As classes litológicas foram parametrizadas com base nas suas características hidrogeológicas, mais especificamente em sua capacidade máxima de armazenamento nos aquíferos inferior e superior. As estimativas do coeficiente de armazenamento do reservatório superior e inferior de água subterrânea foram derivadas do trabalho realizado por Schwarze (1999) (Tabela 3).

Tabela 3 - Parametrização das classes de litologia

Litotipo	Máxima capacidade de armazenamento no aquífero superior (mm)	Máxima capacidade de armazenamento no aquífero inferior (mm)	Coefficiente de armazenamento do reservatório superior de água subterrânea (d)	Coefficiente de armazenamento do reservatório inferior de água subterrânea (d)
Ortognaise	50	900	13	365
Sedimentos clásticos	50	800	16	365
Calcário	70	1000	17	365
Siltitos	60	900	14	365
Referência:	Schwarze (1999)			

Na quinta etapa, de calibração e validação do modelo hidrológico, foram avaliados os módulos de inicialização, de estimativa da interceptação da precipitação, de água no solo, de água subterrânea e roteamento do fluxo d'água, escolhidos os mais representativos para a área de estudo e submetidos à calibração automática com auxílio do algoritmo NSGA II (Genético Multiobjetivo II), adotando-se o número de 5000 iterações e baseando-se no passo de tempo diário (SRINIVAS e DEB, 1994) (Tabela 4).

Tabela 4 – Módulos e descrição dos parâmetros aplicados à calibração no modelo JAMS J2000 para a área de estudo na bacia hidrográfica do ribeirão Jequitibá.

Módulo	Parâmetro	Descrição
Inicialização	mFCa	Multiplicador da capacidade de campo
	mACa	Multiplicador da capacidade de ar
	initRG1	Capacidade inicial relativa de armazenamento no reservatório subterrâneo superior
	initRG2	Capacidade inicial relativa de armazenamento no reservatório subterrâneo inferior
Interceptação	$\alpha$ , rain	Capacidade máxima de interceptação da área foliar por m <sup>2</sup>
Água no Solo	soiMaxDPS	Capacidade máxima de armazenamento na superfície
	soilPolRed	Fator de redução polinomial da evapotranspiração potencial
	soilLinRed	Fator de redução linear da evapotranspiração potencial
	soilMaxInfl	Máxima infiltração entre os meses abril e setembro

	soilMaxInf2	Máxima infiltração entre os meses outubro e março
	soilImpGT80	Capacidade relativa de infiltração em áreas com impermeabilização acima de 80%
	soilImpLT80	Capacidade relativa de infiltração em áreas com impermeabilização abaixo de 80%
	soilDistMPSLPS	Coefficiente de distribuição da infiltração entre os poros grandes e médios
	soilDiffMPSLPS	Coefficiente de difusão dos poros grandes para os poros e médios
	soilOutLPS	Coefficiente de saída para os poros grandes
	soilLatVertLPS	Coefficiente de distribuição entre interfluxo e percolação
	soilMaxPerc	Capacidade máxima de percolação
	soilConcRD1	Coefficiente de retenção do escoamento superficial
	soilConcRD2	Coefficiente de retenção do interfluxo
Água subterrânea	gwRG1RG2dist	Coefficiente de distribuição entre os reservatórios subterrâneos inferior e superior
	gwRG1fact	Fator de dinâmica do escoamento no reservatório subterrâneo superior
	gwRG2fact	Fator de dinâmica do escoamento no reservatório subterrâneo inferior
	gwCapRise	Fator de definição da capilaridade
Roteamento	flowRouteTA	Tempo de concentração

Após adotar os parâmetros de calibração, o desempenho do modelo hidrológico foi testado por meio de quatro equações: i) porcentagem de viés (PBIAS); ii) coeficiente de determinação ( $R^2$ ); iii) coeficiente de eficiência Nash – Sutcliffe (NSE); e iv) logaritmo natural do coeficiente NSE (LNSE). De acordo com Gupta, Sorooshian e Yapo (1999), o PBIAS estima a tendência percentual dos dados simulados serem maiores ou menores do que os dados observados e pode ser descrito pela seguinte equação:

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{t=1}^n (y_i - o_i)}{\sum_{t=1}^n o_i} \right] \times 100$$

Onde PBIAS é a porcentagem de viés (%);  $y_i$  é a vazão simulada, em  $m^3/s$ ;  $o_i$  é a vazão observada, em  $m^3/s$ . O valor 0 (zero) é o resultado da equação que indica um desempenho

ótimo do modelo hidrológico. Valores positivos ou negativos indicam, respectivamente, que o modelo superestima ou subestima os resultados da vazão simulada.

O  $R^2$  é um teste estatístico indicador da dispersão linear entre os valores de vazão observada e simulada e pode ser expressa pela seguinte equação (PEARSON, 1895 apud LEE RODGERS e NICEWANDER, 1988):

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - O^{méd})(y_i - Y^{méd})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_i - O^{méd})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - Y^{méd})^2}} \right)^2$$

Onde,  $R^2$  é o coeficiente de determinação (adimensional) e  $o_i$ ,  $O^{méd}$ ,  $y_i$  e  $Y^{méd}$  representam, respectivamente, a vazão observada, a vazão observada média, a vazão simulada e a vazão simulada média, em  $m^3/s$ . O intervalo deste teste se situa entre 0 e 1, onde 0 significa que não há nenhuma correlação entre os valores simulados e observados e 1 indica que os valores simulados são iguais aos observados. Nesse sentido, quanto maior o valor de  $R^2$ , maior é a eficiência do modelo hidrológico.

Recomenda-se que este teste seja aplicado juntamente com outras análises estatísticas, devido ao fato dele estimar apenas a dispersão linear entre os dados observados e simulados, desconsiderando as variações mínimas e máximas das vazões em modelos hidrológicos (KRAUSE, BOYLE e BÄSE, 2005).

Os mesmos autores indicaram o uso do coeficiente NSE e o seu logaritmo natural (LNSE), por se tratarem da soma das diferenças absolutas entre os valores de observados e simulados durante o período de estudo, representando as respostas da bacia hidrográfica para as vazões de base e as vazões de pico. Os coeficientes NSE e LNSE são apresentados nas equações abaixo (NASH e SUTCLIFFE, 1970):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - O^{méd})^2}$$

$$LNSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln o_i - \ln y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\ln o_i - \ln O^{méd})^2}$$

Onde  $\ln$  representa o logaritmo natural e  $o_i$ ,  $O^{méd}$ ,  $y_i$  e  $Y^{méd}$  representam, respectivamente, a vazão observada, a vazão observada média, a vazão simulada e a vazão

simulada média, em m<sup>3</sup>/s. Os valores de NSE e de LNSE (adimensionais) podem variar de  $-\infty$  a 1, sendo que quanto mais próximos de 1, maior é o ajuste entre os valores simulados e observados. Resultados abaixo de 0 indicam que os valores médios da série temporal observada possuem mais representatividade do que o modelo predito. Nesse sentido, a classificação da eficiência do modelo hidrológico foi realizada conforme os valores obtidos das equações PBIAS e NSE, apresentados na Tabela 5 (MORIASI et al., 2007).

Tabela 5 – Avaliação do desempenho do modelo hidrológico aplicado a área de contribuição na bacia hidrográfica do ribeirão Jequitibá, MG.

PBIAS (%)	NSE	Classificação
0 a 10	0,75 a 1	Muito bom
10 a 15	0,65 a 0,75	Bom
15 a 25	0,50 a 0,65	Satisfatório
> 25	< 0,50	Insatisfatório

A avaliação do desempenho do modelo foi feita separadamente para os períodos de calibração (2008 a 2011), validação (2012 a 2016) e período completo dos dados (2003 a 2016), permitindo, assim, verificar a reaplicação dos parâmetros em bacias com características semelhantes de solo, de uso do solo, de geologia, de relevo e de clima.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área total da bacia foi discretizada em 22.920 URHs, cada uma com características topológicas semelhantes quanto ao tipo de solo, à classe de relevo, ao uso e cobertura do solo, entre outros. Tais atributos, juntamente com os dados de clima, submetidos às 5000 iterações, resultaram em valores específicos para cada parâmetro presente nos módulos do software JAMS J2000, conforme apresentados na Tabela 6.



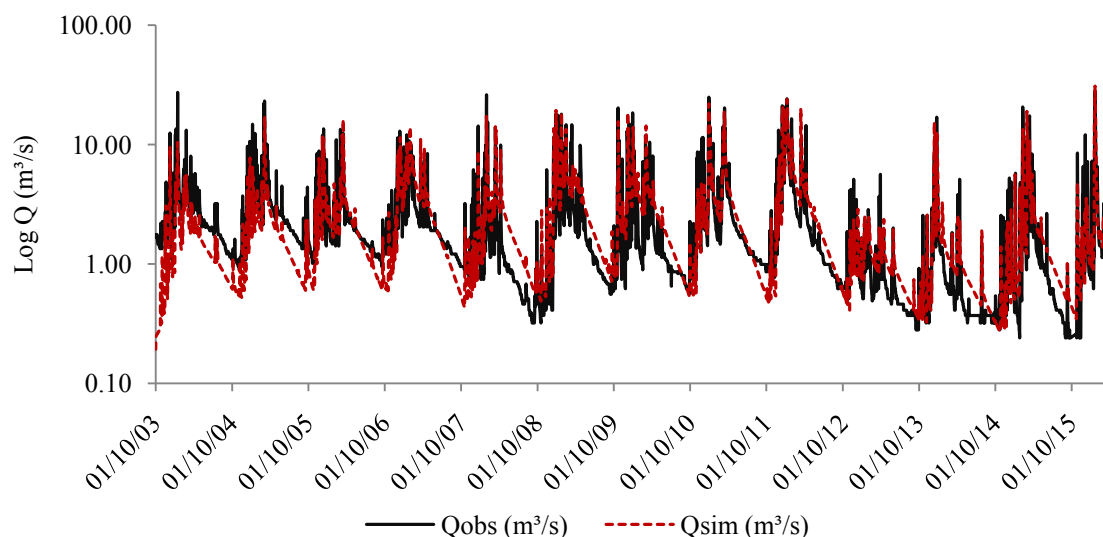
Tabela 6 – Valores dos parâmetros adotados após calibração, para a área de estudo na bacia hidrográfica do ribeirão Jequitibá.

Módulo	Parâmetro	Intervalo	Unidades	Valor calibrado
Inicialização	mFCa	0 a 5	—	4,99
	mACa	0 a 5	—	4,98
	initRG1	0 a 1	—	0,40
	initRG2	0 a 1	—	0,72
Interceptação	$\alpha$ ,rain	0 a 10	mm	5,80
	soiMaxDPS	0 a 10	mm	3,49
	soilPolRed	0 a 10	—	6,78
	soilLinRed	0 a 10	—	1,57
Água no Solo	soilMaxInf1	0 a 200	mm	129,97
	soilMaxInf2	1 a 200	mm	75,99
	soilImpGT80	0 a 1	—	0,07
	soilImpLT80	1 a 1	—	0,31
	soilDistMPSLPS	0 a 10	—	0,13
	soilDiffMPSLPS	0 a 10	—	0,34
	soilOutLPS	0 a 10	—	2,27
	soilLatVertLPS	0 a 10	—	0,70
	soilMaxPerc	0 a 20	mm	5,10
	soilConcRD1	0 a 10	—	1,49
	soilConcRD2	1 a 10	—	9,99
	Água subterrânea	gwRG1RG2dist	0 a 1	—
gwRG1fact		0 a 10	—	3,40
gwRG2fact		0 a 10	—	1,27
gwCapRise		0 a 1	—	0,41
Roteamento	flowRouteTA	0 a 100	h	46,80

A Tabela 3 revela que, dos 24 parâmetros analisados, apenas 3 apresentaram valores muito próximos do intervalo limite máximo estabelecido pelo modelo, sendo o mFCa (4,99); o mACa (4,98); e o soilConcRD1 (9,99), todos relacionados às características físicas dos solos. No entanto, foi possível estimar um maior valor para a máxima infiltração entre os meses de abril e setembro, com valores de, aproximadamente, 130 mm em detrimento da máxima infiltração entre os meses de outubro a março (75,99 mm), o que pode ser explicado pela condição de saturação dos meso e dos macroporos dos solos nos meses chuvosos do ano.

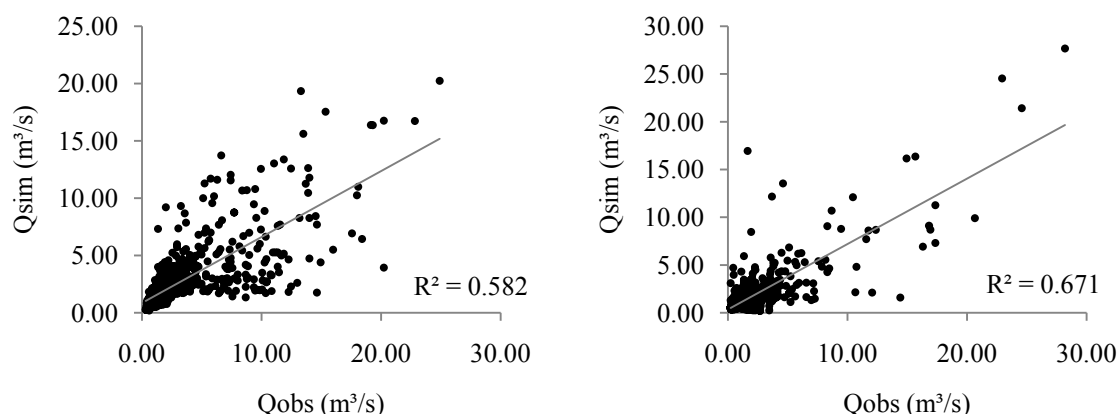
A parametrização também permitiu representar em ambiente SIG a dinâmica hidrológica da área e, assim, simular as vazões da área de estudo e compará-las com as vazões observadas no período completo de 2003 a 2016, conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Vazão simulada e vazão observada, entre o período de 2003 a 2016, para a área de estudo na bacia hidrográfica do ribeirão Jequitibá.



O hidrograma revela a capacidade do modelo em ilustrar os processos de manutenção das vazões de base pelas águas subterrâneas e as respostas das vazões de pico em função dos eventos de chuva. As vazões máxima, média e mínima simuladas apresentaram valores de 30,8 m³/s; 2,34 m³/s; e 0,19 m³/s, respectivamente. Tais resultados se aproximaram das vazões observadas, com valores de 28,2 m³/s (máxima); 2,26 m³/s (média); e 0,24 m³/s (mínima). A aproximação dos valores de vazões simuladas e observadas refletiu no desempenho geral do modelo, que pode ser observado na Figura 4 e na Tabela 4.

Figura 4 – Dispersão entre os valores de vazão observada e simulada para o período de calibração (a) e validação (b) do modelo hidrológico



A Figura 4 revela uma maior dispersão entre as vazões simuladas e observadas na etapa de calibração, em comparação com os resultados obtidos na etapa de validação. Os gráficos também ilustram que o modelo teve maior eficiência na representação das vazões menores que  $10\text{m}^3/\text{s}$ , indicando uma melhor representatividade para simular os fluxos de base em relação às vazões de pico que, por sua vez, apresentaram maior aderência à linha de tendência, na etapa de validação. O modelo também apresentou bom desempenho geral em relação ao PBIAS, NSE e LNSE, conforme Moriasi et al. (2007) - Tabela 7.

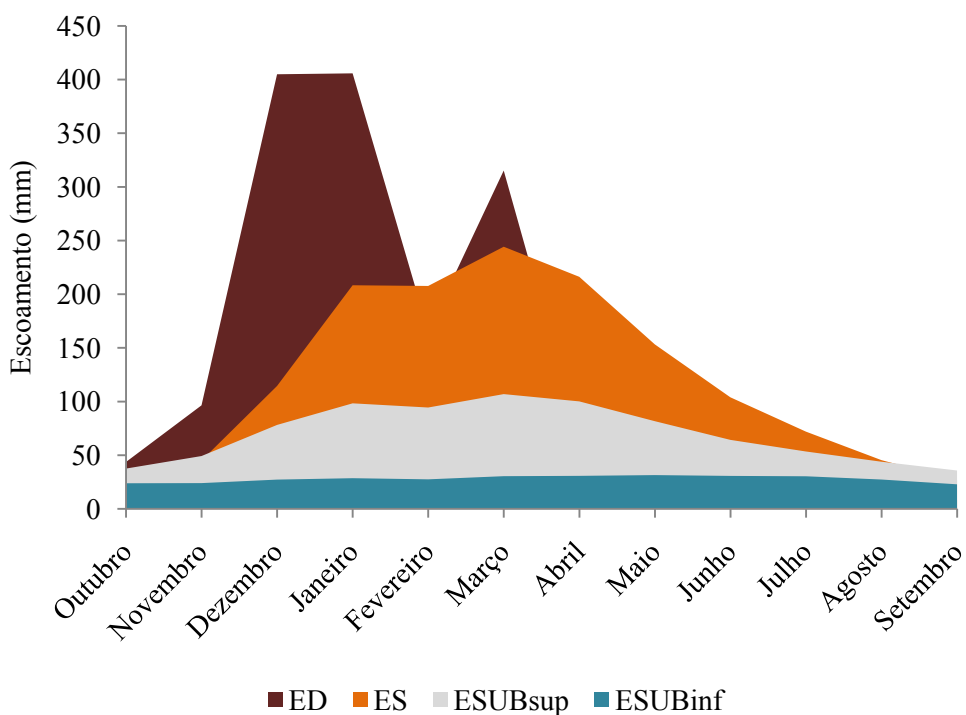
Tabela 7 – Eficiência do modelo hidrológico aplicado à área de estudo na bacia hidrográfica do ribeirão Jequitibá.

Eficiência	Período de avaliação		
	Calibração	Validação	Período completo
PBIAS	-9,5%	-3,65%	3,8%
R <sup>2</sup>	0,58	0,67	0,66
NSE	0,58	0,67	0,64
LNSE	0,62	0,60	0,60

As eficiências apresentadas no período de calibração referem-se a um ano hidrológico com média de precipitação diária de  $4,37\text{mm}$ , quantidade acima da observada para o período de validação ( $3,55\text{mm}$ ), o qual apresentou PBIAS indicando uma maior subestimação ( $-9,5\%$ ) da vazão, em comparação com os outros dois períodos (validação e período completo). Por representar uma área cárstica, ao se observar o desempenho do período completo, verifica-se a sua viabilidade de transposição para outras áreas com características físicas semelhantes (KLEMES, 1986).

Em relação aos componentes do escoamento, durante todo o período estudado o escoamento superficial direto (ED) apresentou valor médio de 0,33 mm, chegando a 11,47 mm. Esses valores representam a água que não foi interceptada, não sofreu evaporação e não infiltrou no solo. Já o escoamento subsuperficial (ES), aquele que ocorre entre as camadas do solo, apresentou valor médio de 0,33 mm e valor máximo de 1,49 mm, indicando ser um fluxo mais constante do que o primeiro, embora com picos menores. O escoamento subterrâneo superior (ESUBsup) apresentou valor médio de 0,18 mm e valor máximo de 0,39 mm, enquanto o escoamento subterrâneo inferior (ESUBinf) apresentou valores médios e máximos de 0,07 mm e 0,17 mm, respectivamente. Cada escoamento apresenta um comportamento distinto durante o ano hidrológico, conforme ilustrado na Figura 5.

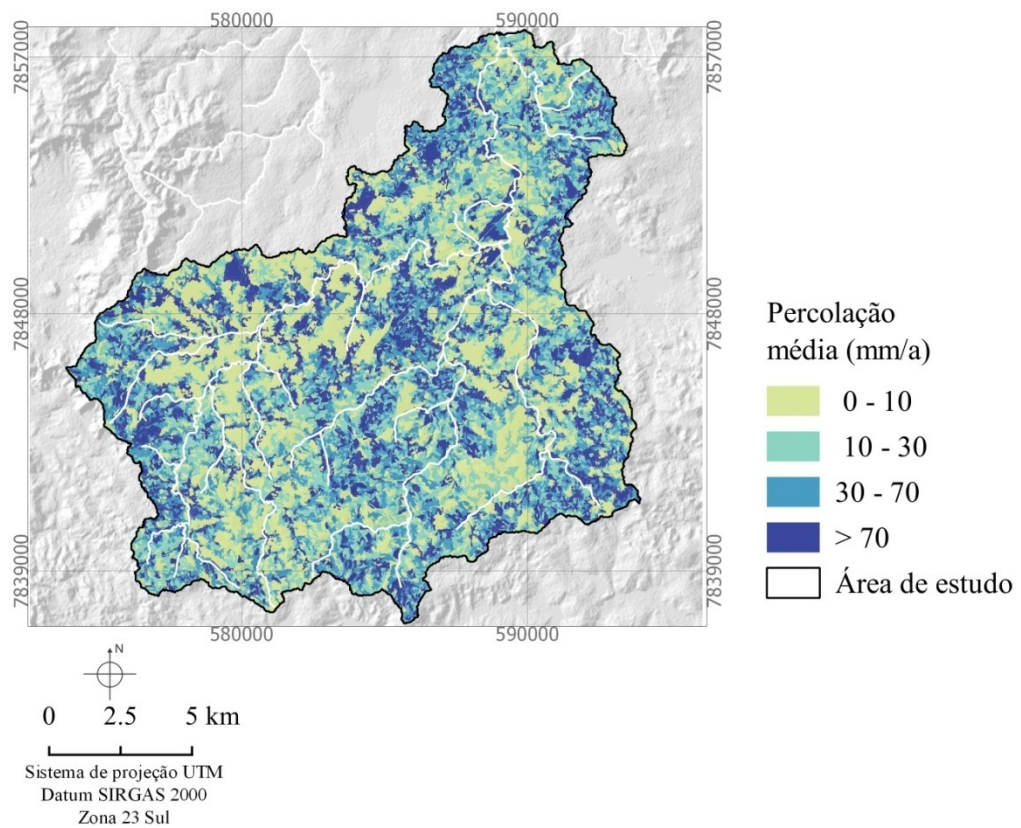
Figura 5 – Média mensal dos componentes do escoamento durante o período de 2003 a 2016 na área de estudo.



Observa-se que o ED é o componente dominante entre os meses chuvosos de outubro a janeiro e, em março, responde por 36% do fluxo de água durante o ano hidrológico, enquanto o ES responde por 35% e predomina entre os meses de fevereiro e de abril a agosto (Figura 5). Os escoamentos subterrâneos ESUBsup e ESUBinf, somados, respondem por 28,3% do escoamento na área.

A intensidade das chuvas, a impermeabilização do solo, a topografia e as características pedológicas do terreno determinam a velocidade de escoamento superficial e indicam o volume de água que pode ser infiltrado no solo para recarga de aquíferos. Durante o período de estudo, foi modelado um volume médio percolado igual de 31,9 mm, sendo as áreas urbanizadas os locais de menor ocorrência (Figura 6).

Figura 6 – Distribuição espacial da percolação média anual de água no solo na área de estudo

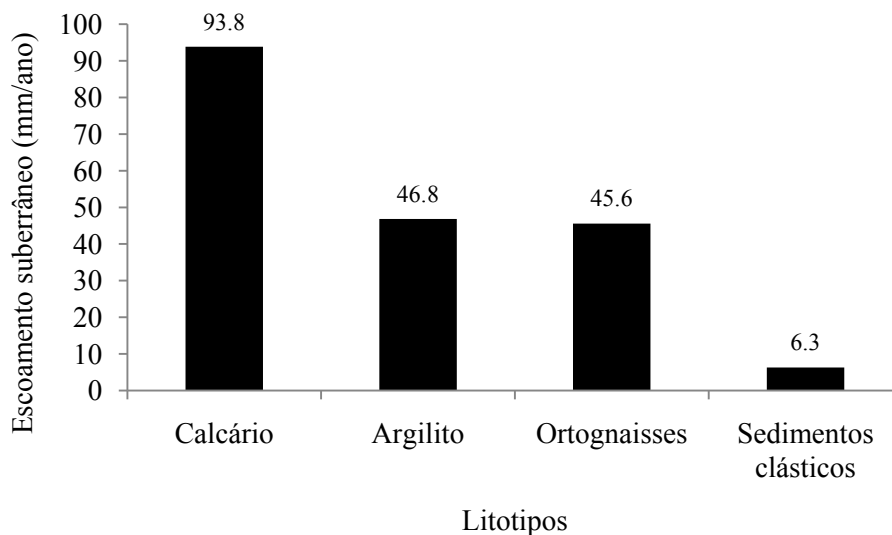


A percolação tem distribuição espacial variada ao longo da área de estudo. Apesar de não serem os mais espacialmente abrangentes na área, houve maior volume percolado médio em áreas da classe dos Latossolos, chegando a valores próximos a 100 mm/ano durante o período estudado, o que pode ser justificado pelas suas características físicas relacionadas à capacidade de campo e quantidade de meso e macroporos, além de sua densidade. Em segundo lugar, verificou-se maiores valores percolados em solos do tipo Cambissolos, com valores médios próximos a 30 mm/ano.

No que diz respeito à modelagem do escoamento subterrâneo (superior e inferior, estimados juntos) por litotipos, verificou-se predominância da percolação nas áreas de calcário (93,8 mm/ano), seguido das áreas de argilito (46,8 mm/ano) e Ortognaisses (45,6

mm/ano). Devido às suas características e por serem a classe de litologia menos abrangente, os sedimentos clásticos foram os que tiveram menor escoamento médio anual (6,3 mm/ano) (Figura 7).

Figura 7 – Escoamento subterrâneo médio anual por litotipo na área de estudo



O escoamento subterrâneo médio anual modelado apresentou valores de 192,5 mm. Em estudo realizado na bacia hidrográfica do rio Corgo, em Portugal, Alencão et al. (2000) estimaram escoamento médio de 112,6 mm, para um período de 23 anos. Já em estudo realizado em sistemas aquíferos em Portugal, foi encontrada uma faixa de escoamento médio anual variando de 27 a 248 mm/ano (VIEIRA e MONTEIRO, 2003).

Avaliando a estimativa de recarga de aquífero e enquadramento dos corpos de água para duas sub-bacias parcialmente florestadas no Noroeste do Rio Grande do Sul, Graepin et al. (2016) encontraram maiores valores para aquela com maior percentual de vegetação em comparação com a bacia que estava menos vegetada. Os autores atribuíram os resultados às melhores condições para a infiltração da água no solo proporcionadas pela cobertura vegetal.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da complexidade na representação, em ambiente SIG, dos processos ambientais hidrológicos em áreas cársticas, o modelo hidrológico JAMS J2000 atendeu ao objetivo de descrever a dinâmica do ambiente, de acordo com os resultados dos testes. Tais eficiências podem ser aumentadas à medida que dados obtidos por meio da bibliografia e por

meio de modelos preditivos dos parâmetros hidráulicos do solo sejam substituídos por dados obtidos em campo, principalmente, as informações de profundidade total e efetiva dos solos, densidade, condutividade hidráulica, capacidade de campo e ponto de murcha.

A dinâmica dos escoamentos demonstrou que, nos meses de agosto e setembro, os volumes de escoamento são os menores do ano, sendo mantidos apenas pelo fluxo de águas subterrâneas superior e inferior. Durante esses meses, sugere-se que sejam adotadas práticas criteriosas de consumo e destinação de água para atividades antrópicas, de modo a não super-explotados recursos hídricos e comprometer tanto o ecossistema hídrico nesse ambiente cárstico quanto a disponibilidade de água, nos demais meses do ano.

As URHs que apresentaram maiores valores de percolação média são os locais de maior probabilidade de recarga hídrica na área de estudo e que devem manter-se permeáveis para não limitar o volume de água que abastece os aquíferos.

A modelagem realizada pode ser utilizada para nortear a tomada de ações e os planejamentos voltados para a proteção e recuperação ambiental, principalmente nas áreas de recarga. Pode também ser reaplicada em outras áreas com características semelhantes e utilizada para simular e mensurar os efeitos de ações antrópicas nos recursos hídricos locais.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Minas Gerais e ao Laboratório de Solos e Meio Ambiente, do Instituto de Geociência, pelo apoio pessoal e infraestrutura para realização deste trabalho. À FAPEMIG pelo apoio financeiro ao projeto CRA- APQ-03178-13.

À Universidade de JENA (Alemanha) pelo treinamento na utilização do software JAMS J2000, à EMBRAPA Milho e Sorgo e a EMBRAPA Solos pelo apoio técnico e teórico, ao departamento e Engenharia da UFMG pelo apoio técnico.

## **5. REFERÊNCIAS**

ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; e RASMUSSEN, J. An introduction to the European Hydrological System—SystemeHydrologiqueEuropeen,“SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. **Journalofhydrology**, v. 87, n. 1, p. 45-59, 1986.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **HidroWEB: Acervo de dados hidrológicos**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>>. Acesso em: 01 ago. 2017.

ALENCOÃO, A. M. P.; PACHECO, F. A. L.; PORTUGAL FERREIRA, M. R. V. **A bacia hidrográfica do rio Corgo (NE Portugal): escoamento subterrâneo e parâmetros influentes**. 2000. Disponível em: <<https://repositorio.utad.pt/>>. Acesso em: 01 jan. 2018.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; e WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development1. **Journal of the American Water Resources Association**. v-34, p. 73-89, 1998.

AULER, A. S.; PILÓ, L. B.; SAADI, A. **Ambientes cársticos**. Quaternário do Brasil. Ribeirão Preto: Holos, p. 321-342, 2005.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. **Hydrological Sciences Journal**, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.

BRAGA, C. C.; AMANAJÁS, J. C.; ALCÂNTARA, C. R.; DANTAS, M. P. **Avaliação do albedo nos diferentes tipos de cobertura do cerrado do Amapá-Brasil com imagens MODIS**. Territorium, n. 25 (I), p. 129-134, 2017.

CODEMIG/CPRM – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais/ Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa geológico do Estado de Minas Gerais (2014)**. Disponível em: <<http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/>>. Acesso: 16 de Nov. 2017.

COE, M. T.; COSTA, M. H.; HOWARD, E. A. Long-term simulations of surface waters of the Amazon river basin: impacts of new river geomorphic and flow parameterizations. **Hydrological Processes**, n. 22, p. 2542–2553, 2008.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Hydrologic simulation of large basins. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, 2001.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-**FAO Irrigation and drainage paper 56**. Fao, Rome, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

GIONGO, P. R.; VETTORAZZI. **Albedo da superfície por meio de imagens TM-Landsat 5 e modelo numérico do terreno**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi, v. 18, n. 8, 2014.

GRAEPIN, C.; MANCUSO, M. A.; CAMARGO, M.; DA SILVA, J. L. S.; e DE BORBA, W. F. **Estimativa de Recarga de Aquífero e Enquadramento dos Corpos de Água em Sub-Bacias Parcialmente Florestadas no Noroeste do Rio Grande do Sul**. Anuário do Instituto de Geociências, v. 39, n. 3, p. 25-31, 2016.



GUPTA, H.V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P.O. **Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration.** Journal of Hydrologic Engineering, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.

HARTMANN, A.; GOLDSCHIEDER, N.; WAGENER, T.; LANGE, J.; e WEILER, M. Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches. **Reviews of Geophysics**, v. 52, n. 3, p. 218-242, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Banco de dados históricos.** Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 07 jul. 2017.

JAXA/METI. ALOS PALSAR WBI, 2010. Disponível em: <<https://www.asf.alaska.edu>>. Acesso em 26 Set 2017.

KINZELBACH, W. **Groundwater modelling: an introduction with sample programs in BASIC.** Elsevier, 1986.

KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrological Sciences Journal**, V. 31, n.1, 1986.

KOVÁCS, A; SAUTER, M. Modelling karst hydrodynamics. In: **Methods in karst hydrogeology.** CRC Press, 2014. p. 215-236.

KRALISCH, S.; KRAUSE, P.; FINK, M.; FISCHER, C.; FLUGEL, W. - A. **Component based environmental modelling using the JAMS framework.** In: KULASIRI, D.; OXLEY, L. (Ed.). THE MODSIM 2007 INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION, 2007, Christchurch. Proceedings... New Zealand: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 2007.

KRAUSE, P. **J2000 - Ein Modellsystem zur physikalisch-basierten Nachbildung der hydrologischen Prozesse in großen Flusseinzugsgebieten.** Freiburg: Albert-Ludwigs-Universität, 2001.

KRAUSE, P. Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the J2000 model. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C.** 2002, v. 27, n. 9-10, p. 663-673.

KRAUSE, P; BOYLE, D. P.; BÄSE, Frank. **Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment.** Advances in geosciences, v. 5, p. 89-97, 2005.

KÜNNE, A.; PENEDO, S.; KRALISCH, S. SCHULER, A. E.; PRADO, R. B.; SANTOS, J. M.; FLÜGEL, W.A. Modelagem de Processos Hidrológicos em Bacias de Mesoescala Escassamente Monitoradas na Mata Atlântica, RJ, Brasil. In: **Anais-I e II Workshop em Engenharia de Biosistemas-WEBS.** 2016.

LEE RODGERS, J; NICEWANDER, W. A. **Thirteen ways to look at the correlation coefficient.** The American Statistician, v. 42, n. 1, p. 59-66, 1988.

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

MACHADO, A. R.; JUNIOR, M.; VIEIRA, A.; E WENDLAND, E. C. Avaliação do modelo J2000/JAMS para modelagem hidrológica em bacias hidrográficas brasileiras. **Eng. sanit. ambient**, v. 22, n. 2, p. 327-340, 2017.

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

NEPAL, S.; FLÜGEL, W-A.; SHRESTHA, A. B. Upstream-downstream linkages of hydrological processes in the Himalayan region. **Ecological Processes**, v. 3, n. 1, p. 19, 2014.

PINTO C. P.; SILVA M. A. **Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais**. CODEMIG/CPRM, 2014. Disponível em: <www.portaldageologia.com.br>. Acesso em:13 Set 2017.

RIBEIRO, E. P.; NÓBREGA, R. S.; MOTA FILHO, F. O.; MOREIRA, E. B. **Estimativa dos índices de vegetação na detecção de mudanças ambientais na bacia hidrográfica do rio Pajeú**. Geosul, v. 31, n. 62, p. 59-92, 2016.

SCOLFORO, J. R.; MELLO, J. M.; SILVA, C. P. de C. (Ed.), **Inventário Florestal de Minas Gerais: Floresta Estacional Semidecidual e Ombrófila - Florística, Estrutura, Diversidade, Similaridade, Distribuição Diamétrica e de Altura, Volumetria, Tendências de Crescimento e Áreas aptas para o Manejo Florestal**.Lavras: UFLA, 2008, cap, 5, p,255-335.

SRINIVAS, N.; DEB, K. **Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms**. Evolutionary computation, v. 2, n. 3, p. 221-248, 1994.

SCHWARZE, C. P.; WOLLMANN, H. A.; BINDER, G.; RANKE, M. B. Short-term increments of insulin-like growth factor I (IGF-I) and IGF-binding protein-3 predict the growth response to growth hormone (GH) therapy in GH-sensitive children. **Acta Paediatrica**, v. 88, p. 200-208, 1999.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFV; UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS. **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais**. Mapa col. 1: 600.000. Projeção Policônica, 2010.

VIEIRA, J.; MONTEIRO, J. P. **Atribuição de propriedades a redes não estruturadas de elementos finitos triangulares (aplicação ao cálculo da recarga de sistemas aquíferos do Algarve)**. As Águas Subterrâneas no Sul da Península Ibérica. Assoc. Intern. Hidrog. APRH publ., pp183-192, 2003.

WADA, Y.; VAN BEEK, L. P.;VAN KEMPEN, C. M.; RECKMAN, J. W.; VASAK, S.; e BIERKENS, M. F. **Global depletion of groundwater resources**. Geophysical research letters, v. 37, n. 20, 2010.

## **CAPÍTULO 2**

### **Modelagem e caracterização de vazões da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG**

Resumo: O entendimento da dinâmica fluvial se torna uma questão inicial essencial para o planejamento ambiental de bacias hidrográficas. Este trabalho objetivou realizar a modelagem e a caracterização das vazões na bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG. A metodologia foi desenvolvida em 7 etapas principais: i) Pré-processamento dos dados de entrada e delimitação das unidades de resposta hidrológicamente homogêneas URH; ii) Obtenção de série sintética de vazões; iii) Elaboração de curva-chave de vazões; iv) Avaliação da precisão dos resultados simulados; v) Obtenção de curva de permanência de vazões; vi) Estimativa do período de retorno de vazões mínimas e máximas; vii) Cálculo das vazões de referência. Os resultados demonstraram que, no período estudado, a precipitação e a vazão média corresponderam a 4,05 mm e 0,21 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Já a menor vazão modelada foi referente ao mês novembro de 2014, chegando a 0,03 m<sup>3</sup>/s, o que pode ser justificado pelo baixo volume de precipitação nesse ano (710 mm), quando comparado com as médias dos demais anos da série estudada (1.400 mm). Concluiu-se que a série sintética de vazões, obtidas pela modelagem hidrológica, pode ser utilizada para subsidiar planejamentos e estudos ambientais, com base nos resultados dos resíduos e no RMSE apresentados. O software JAMS J200, utilizado para a modelagem, apresenta alto potencial de uso, com destaque para a representação das vazões de base, dos meses mais secos do ano.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica, recursos hídricos, hidrograma, curva-chave.

### **1. INTRODUÇÃO**

O aumento da população e da concentração de atividades antrópicas em regiões ambientalmente vulneráveis, aliados à falta de gerenciamento de recursos hídricos e à baixa precipitação de chuvas, torna a água um bem natural cada vez mais escasso. Qualquer mudança no fluxo natural de um curso de água, seja por alterações climáticas, seja por ações humanas, influencia diretamente em questões econômicas e sociais locais, no que diz respeito ao suprimento de água à população, à geração de energia elétrica e à construção e regulação

de reservatórios, por exemplo. Com isso, o entendimento da dinâmica fluvial se torna uma questão inicial essencial para o planejamento ambiental de bacias hidrográficas (COOMES et al., 2016; HANNA et al., 2011).

Dentre as formas de se obter informações hidrológicas sobre bacias hidrográficas de interesse, está a adequação de vazões observadas a um modelo hidrológico, cujos novos dados poderão estender e complementar os conhecimentos sobre a dinâmica de um rio. Em bacias hidrográficas de pequena escala, essa modelagem se torna mais complexa, devido ao fato de não apresentarem monitoramento contínuo e, assim, não apresentarem série histórica de dados observados para calibração do modelo. As soluções comumente utilizadas para esses casos variam desde a realização de relações matemáticas simples de área/vazão de uma bacia hidrográfica monitorada próxima à área de interesse, até a transposição de modelos hidrológicos já calibrados de áreas semelhantes (em termos de características físicas e climáticas) para a área de estudo (NASH e SUTCLIFFE, 1970; KRAUSE, 2001; MACHADO, 2017).

Outro método utilizado para obtenção de informações é a sintetização de uma curva-chave, que associa valores de vazões e alturas da coluna de água de uma determinada seção, por meio de uma equação matemática. Essa prática requer que as coletas de dados seja suficiente para representar todo o regime hidráulico do curso d'água de interesse. Além disso, essas amostras são obtidas por meio de campanhas de campo a serem realizadas durante várias estações do ano e utilizando instrumentos e métodos específicos (JACCON e CUDO, 1989; CAMPOS et al., 2017).

Assim, a curva-chave oferece informações obtidas *in loco* em tempo real e os modelos hidrológicos, realizados em escritório, podem ser usados para a estimativa de vazões presentes e futuras. Essas estimativas são feitas com base em cálculos que simulam o fluxo de água presente na interação entre a terra e a atmosfera. Assim, as precipitações são consideradas as entradas de água no sistema e a evaporação e a transpiração podem ser consideradas exemplos de saídas. Juntamente com fatores climáticos, os fatores físicos como a topografia, o tipo de solos, a cobertura vegetal, a geologia e o tipo de aquífero, são os elementos que fazem a regulação desse ciclo contínuo (NEPAL, 2014; DURU et al., 2017).

Assim como os fatores físicos e climáticos, o fator humano também tem influência no regime de vazões de um rio. A retirada de água para consumo humano, a implantação e manutenção de sistemas de irrigação e de atividades industriais, além do bombeamento e exploração de águas subterrâneas, bem como a impermeabilização dos solos e a construção de

represas, podem ser considerados exemplos de práticas antrópicas corriqueiras, a que o curso d'água está submetido. Quando essas práticas não são corretamente dimensionadas e baseadas na capacidade hidrológica da bacia hidrográfica, cenários de conflitos potenciais são gerados (SANTOS et al., 2014; CHANG et al., 2015), como é o caso da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro.

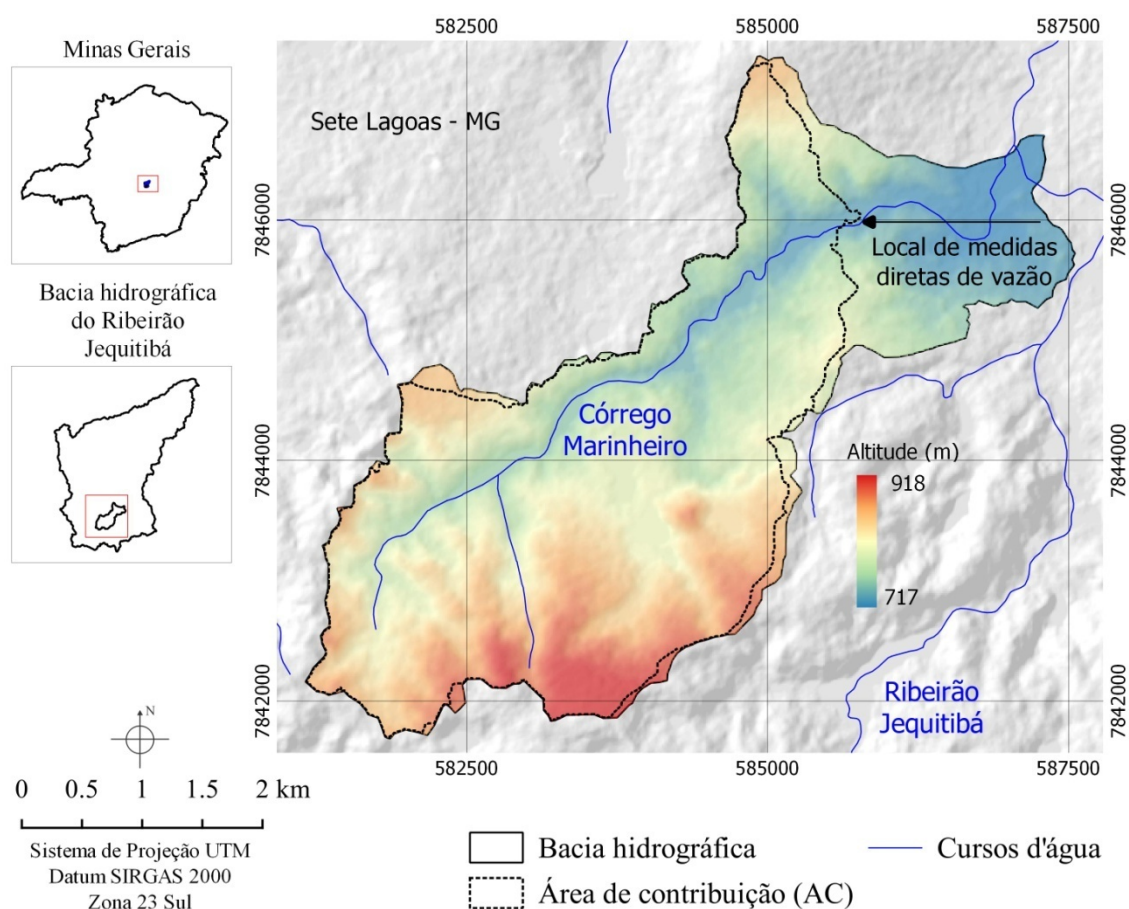
A bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro está localizada em uma região predominantemente cárstica no município de Sete Lagoas (Minas Gerais) e, com isso, se torna uma das poucas fontes de água superficial disponíveis no município. Além do mais, é uma bacia periurbana de um município cujo recente plano diretor direciona a região para a expansão urbana, o que a torna vulnerável à especulação imobiliária e à impermeabilização do solo pela construção de casas e pavimentação asfáltica, além de outros impactos. Adicionalmente, seu curso d'água apresenta relevância ecológica, atuando como diluidor das águas poluídas do seu confluente de maior ordem, o Ribeirão Jequitibá.

Apesar de toda a sua importância e vulnerabilidade, o Córrego Marinheiro não possui monitoramento sistemático e, conseqüentemente, não possui série histórica de vazões, o que, por sua vez, compromete a compreensão sobre a dinâmica ecológica fluvial local e todas as atividades dependentes do seu curso d'água. Assim, objetivou-se realizar a modelagem e a caracterização das vazões na bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

A área de estudo abrange a bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro (Figura 1), que possui 1480 ha e está localizada no município de Sete Lagoas - MG, entre as coordenadas planas 581100,3 a 587493,5 Leste e 7841747,5 a 7847420,3 Norte, Datum geodésico SIRGAS 2000 e projeção UTM 23 sul. Fisionomicamente, a bacia está inserida no bioma Cerrado. No entanto, apresenta fragmentos de vegetação nativa predominantemente do tipo floresta semidecidual montana, típica do bioma Mata Atlântica (COSTA et al., 2015). Também apresenta áreas antropizadas, com plantios de culturas anuais e pastagens para criação de gado (SCOLFORO, 2008). A bacia apresenta três tipos diferentes de litologias: Calcarenitos, Siltitose Granitos (CPRM, 1997) e, as classes de solos presentes na bacia são os Argissolos, os Cambissolos, os Chernossolos, os Gleissolos, os Nitossolos, os Latossolos e os Luvisolos; (OLIVEIRA, 2016).

Figura 1 – Localização da área de estudos



Os materiais utilizados foram: a) mapa de solos com escala de 1:25.000 (OLIVEIRA et al., 2016); b) Modelo Digital de Elevação (MDE) Tandem-X, com resolução espacial de 12 m (WESSEL, 2013); c) Mapa de geologia (SAMPAIO et al., 2016); d) mapa da rede hidrográfica regionalizada do Estado de Minas Gerais com escala de 1:1.000.000, obtida junto à Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD); e) imagens de satélite GeoEye, com resolução espacial de 0,5 m. Além da base cartográfica, foram utilizados dados climáticos de estações pluviométricas dos municípios de Belo Horizonte, Sete Lagoas, Florestal e Conceição do Mato Dentro (BDMET/INMET, 2017). Também, foram utilizados os softwares livres Quantum GIS e SPRING, versão 5.4.3 (INPE, 2016), bem como o *framework* JAMS J2000 (KRAUSE, 2001; 2002), além de micromolinetete Global Water e trena graduada para medição da vazão.

A metodologia foi desenvolvida em 7 etapas principais: i) Pré-processamento dos dados de entrada e delineamento das unidades de resposta hidrológicamente homogêneas URH; ii) Obtenção de série sintética de vazões por meio da transposição de parâmetros previamente

calibrados; iii) elaboração de curva-chave de vazões; iv) avaliação da precisão dos resultados simulados com dados de vazão estimados em campo; v) obtenção de curva de permanência de vazões; vi) estimativa do período de retorno de vazões mínimas e máximas; vii) cálculo das vazões de referência: a) vazão mínima de 7 dias consecutivos com período de recorrência de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ); b) vazão média de longa duração ( $Q_{mld}$ ); e c) vazões mínimas associadas à permanência de 90 e 95% do tempo ( $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ). Em seguida, compararam-se os resultados com as vazões de referência utilizadas pelo Estado de Minas Gerais em processos de concessão de outorgas.

Na primeira etapa, os dados climáticos de precipitação, temperatura mínima, média e máxima do ar, a velocidade do vento, a umidade relativa e as horas de sol foram compilados e tratados, para correção de valores discrepantes e/ou ausentes (NEPAL et al., 2014). Já os dados cartográficos foram pré-processados, por meio da correção geométrica e geográfica, bem como recortados para a área de interesse. Além disso, as imagens GeoEye foram submetidas à classificação supervisionada, no software SPRING, identificando as classes de Área cultivada, Corpo hídrico, Pastagens, Floresta e Solo exposto.

O delineamento das URH, foi baseado no cruzamento do MDE, do mapa de solos, do mapa de geologia e do mapa de uso e cobertura do solo, de modo a reproduzir o fluxo de direção da água e a conexão entre cada URH mapeada (FLUGEL, 1996; PFENNIG, WOLF, 2007).

Na segunda etapa, aplicou-se o modelo distribuído de base física JAMS/J2000 para simular processos hidrológicos, estimando as vazões, em passo de tempo diário, entre o ano civil de 2003 e o de 2016, da bacia hidrográfica do córrego Marinheiro e para a área de contribuição (AC). Os processos hidrológicos foram divididos em quatro tipos de escoamento (direto, subsuperficial, subterrâneo superior e subterrâneo inferior) e com base nas respostas hidrológicas da bacia, essas informações foram relacionadas com a abordagem da onda cinemática de Manning-Strickler para o cálculo da velocidade de fluxo de cada curso d'água (KRAUSE, 2002), conforme expressões abaixo:

$$Q = q_{act} \cdot e^{\left(\frac{-1}{Rk}\right)}$$

Onde  $Q$  é a vazão final ( $m^3/s$ )  $q_{act}$  é a vazão inicial ( $m^3/s$ ) e  $Rk$  é o coeficiente de retenção do escoamento superficial (adimensional). A vazão inicial é calculada por meio da seguinte expressão:

$$q_{act} = M \cdot Rh^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{3}}$$

Onde M (adimensional) é o fator de rugosidade de Manning e I é a declividade do curso d'água (ambos obtidos automaticamente durante etapa de delineamento das URH) e Rh (m) é o raio hidráulico da seção, obtido da seguinte forma;

$$Rh = \frac{A}{b + 2\frac{A}{b}}$$

Onde A é a área da seção (m<sup>2</sup>) e b (m) é a largura da seção do curso d'água (obtido na primeira etapa). O coeficiente de rugosidade (Rk) foi obtido conforme expressão abaixo:

$$Rk = \frac{v}{fl} \cdot TA \cdot 3600$$

Onde v (m/s) é a velocidade e fl (m) é comprimento do fluxo de água (obtidos na primeira etapa) e TA é um parâmetro calibrável que indica o tempo de concentração da vazão (h). Ressalta-se que os parâmetros dos módulos do modelo hidrológico foram baseados em valores previamente calibrados, no modelo JAMS J2K, de uma área de contribuição da bacia hidrográfica do Ribeirão Jequitibá na qual a bacia hidrográfica do córrego Marinheiro está inserida (SALIS et al., 2018). Nesta área de contribuição, as características de solo, de geologia, de clima e de uso e cobertura do solo são semelhantes às da área de estudo.

Na terceira etapa, a determinação da curva-chave foi feita buscando-se ajustar os pares de valores altura da coluna de água (m) e a vazão (Q) a uma equação do tipo polinomial quadrática, que pode ser expressa da seguinte forma:

$$Q = a_1h^2 + a_2h + a_3$$

Onde Q é a vazão a ser determinada (m<sup>3</sup>/s); a<sub>i</sub> são coeficientes de ajuste (adimensionais); e h é a altura da lâmina de água (m). Os dados de velocidade e altura da lâmina de água (m) foram medidos diretamente no local, entre junho de 2015 e fevereiro de 2018, totalizando 142 medições, obtidas nesse intervalo de tempo. Para isso, utilizou-se um micromolinete e uma trena graduada, em seção do tipo circular localizada na saída de um



barramento no curso do rio. Com base nessas aferições, os valores de Q foram calculados conforme a seguinte expressão:

$$Q = A.v$$

Onde Q é a vazão (m<sup>3</sup>/s); v é a velocidade (m/s) e A é a área molhada da seção circular (m<sup>2</sup>) que, por sua vez, é calculada pela seguinte expressão, conforme apresentada por Akgiray (2004):

$$A = \frac{1}{8}(\theta - \text{sen}(\theta)) D^2$$

Onde D (m) é o diâmetro da seção circular e  $\theta$  (em radianos) é o ângulo formado entre o centro da seção e a altura da lâmina de água (h), em metros, que pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\theta = 2 \cos^{-1} \left( 1 - \frac{2h}{D} \right)$$

Na quarta etapa, os mesmos dados de Q utilizados na curva chave também foram utilizados para avaliar a acurácia do modelo hidrológico, por meio da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE em inglês), entre a média mensal dos dados modelados para a AC e a média mensal dos dados estimados por molinete. O RMSE é definido como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - Y_i)^2}{n - 1}}$$

Onde n são os números de observações; O são os valores observados (m<sup>3</sup>/s), e Y são os valores simulados (m<sup>3</sup>/s), no tempo i.

Na quinta etapa, a curva de permanência de vazões foi baseada em função cumulativa de probabilidade essencialmente empírica e não-paramétrica, podendo ser sintetizada como (VOGUEL E FENNESSEY, 1995):

$$p_i = \frac{i}{n+1}$$

Onde  $p_i$  é a probabilidade de igualdade ou excedência; i é o número de ordem do iésimo valor ordenado de vazão; e n é o número de dados ordenados.

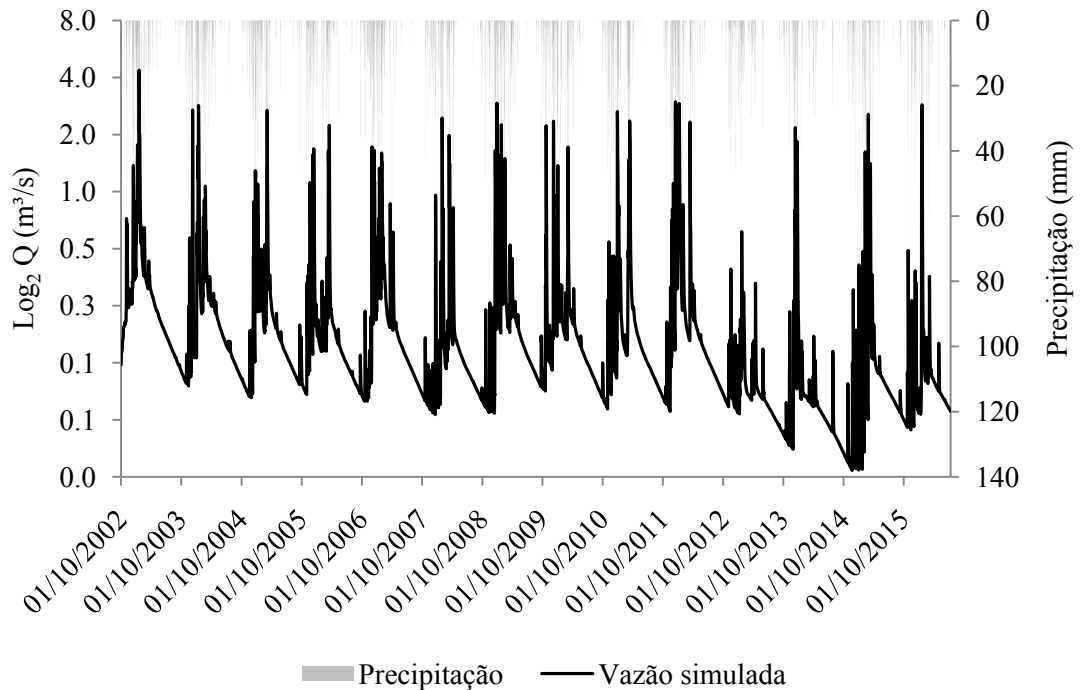
Na sexta etapa, valores máximos e mínimos de vazões foram obtidos para diferentes períodos de retorno (2, 5, 10, 50 e 100 anos), utilizando-se a distribuição de probabilidade Log-normal (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

Na oitava etapa, para o cálculo da  $Q_{7,10}$ , selecionou-se, para cada ano da série histórica, a menor média móvel para o período de sete dias consecutivos. Construída a série histórica de vazões mínimas de sete dias consecutivos, obteve-se a  $Q_{7,10}$  com o emprego da distribuição de probabilidade de Weibull. Já a  $Q_{mld}$  foi obtida a partir da média das vazões médias diárias anuais. As vazões  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  foram obtidas com base na curva de permanência (elaborada na etapa 5) (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Por fim, os resultados foram comparados com os valores de vazões de referência presentes na hidrografia regionalizada, utilizados pela SEMAD para gestão dos recursos hídricos mineiros.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Após transferir os parâmetros da área de contribuição da bacia hidrográfica do Ribeirão Jequitibá para a bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, sem nova parametrização ou calibração, foi possível obter o modelo hidrológico do comportamento da área de estudo em eventos de secas e de chuvas, ilustrado pela série sintética de vazões referente ao início do ano civil de 2003 até 30 de junho de 2016 (Figura 2).

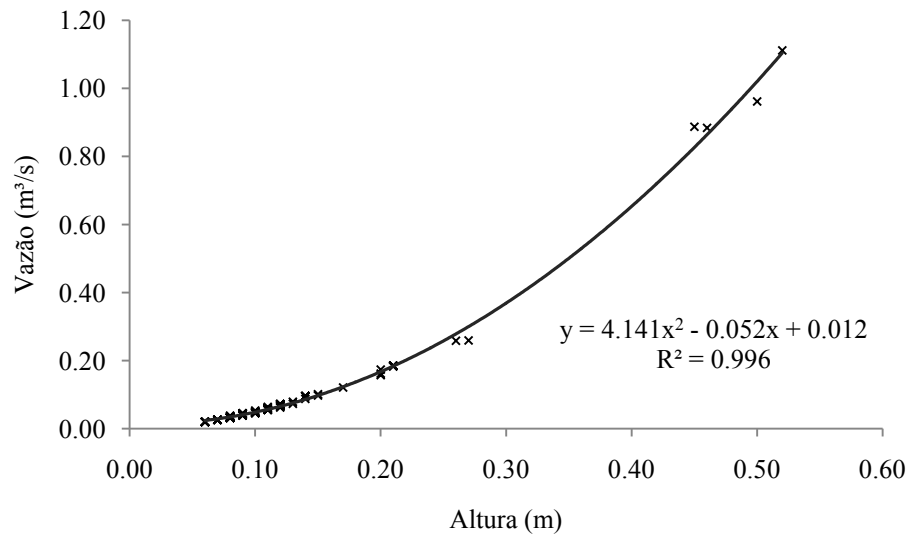
Figura 2 – Série sintética de vazões e série temporal de precipitação na bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG.



No período estudado, a precipitação e a vazão média diária corresponderam a 4,05 mm e 0,21 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Já a menor vazão modelada refere-se ao mês novembro de 2014, chegando a 0,03 m<sup>3</sup>/s, o que pode ser justificado pelo baixo volume de precipitação nesse ano (710 mm), quando comparado com as médias dos demais anos da série estudada (1.400 mm).

Durante o período de monitoramento das vazões, foi possível observar distintos regimes hídricos no Córrego Marinheiro de modo que, em uma área de contribuição de 1.171,7 ha, a média das vazões obtidas diretamente correspondeu a 0,13 m<sup>3</sup>/s e a altura da lâmina de água variou dentre 0,09 e 0,52 m (Figura 3).

Figura 3 – Curva-chave traçada para o córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG.

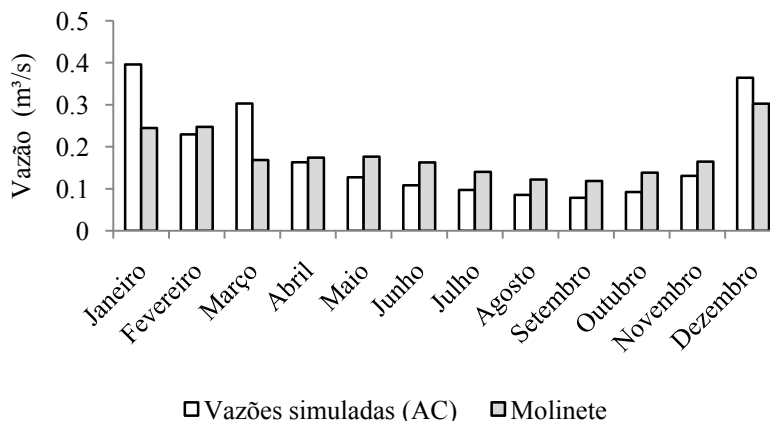


Apesar de não ter registrado valores de altura e de vazão na parte central da curva, a equação polinomial (Figura 3) teve um alto valor de coeficiente de determinação, igual a 0,996, indicando uma correspondência significativa entre os valores da altura da lâmina de água e os valores de vazão. Isto permite a utilização dessa equação nas próximas medições de vazão na área, principalmente em períodos secos do ano.

Nesse sentido, as vazões para uma determinada lâmina de água também poderão ser obtidas *in loco* por meio da curva-chave ajustada para a área de contribuição (AC), a montante da seção já destacada, utilizando a equação da curva chave:  $Q = 4,141h^2 - 0,052h + 0,012$ . Com isso, o monitoramento fluviométrico se torna mais prático, preciso, com menor custo e mais direto.

No entanto, é válido ponderar que, nos períodos chuvosos, a curva-chave pode não ajustar-se perfeitamente ao fluxo d'água devido ao fato do escoamento pelo ladrão do barramento, que não é contabilizado pela curva-chave, nos eventos de cheia com vazões superiores a 1,20 m<sup>3</sup>/s (aproximadamente). Isso compromete a capacidade de estimativa da vazão nessas situações extremas. Porém, ao avaliar os resultados das vazões médias mensais obtidas *in loco* e as vazões sintéticas modeladas, verificou-se uma diferença média de 0,001 m<sup>3</sup>/s (Figura 4).

Figura 4 – Comparação entre as vazões médias mensais observadas e vazões as médias mensais sintéticas obtidas para a área de contribuição do ponto de medições de vazão na bacia hidrográfica do Córrego do Marinheiro, Sete Lagoas – MG.



Nos meses de abril a novembro, as vazões médias mensais sintéticas foram inferiores às vazões observadas. No entanto, no período chuvoso, as vazões médias modeladas foram maiores do que as vazões estimadas no local. As vazões médias mensais, referentes aos meses de janeiro e março, foram as que mais apresentaram diferenças entre os valores observados e os modelados, indicando uma ligeira superestimação das vazões sintéticas nestes meses, em particular. No entanto, nos demais meses, as vazões modeladas se aproximaram das vazões observadas, com destaque para os resultados dos períodos secos do ano que apresentaram menores resíduos (Tabela 1).

Tabela 1 – Resíduos e RMSE das vazões médias mensais simuladas e obtidas por meio de molinete para no Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG

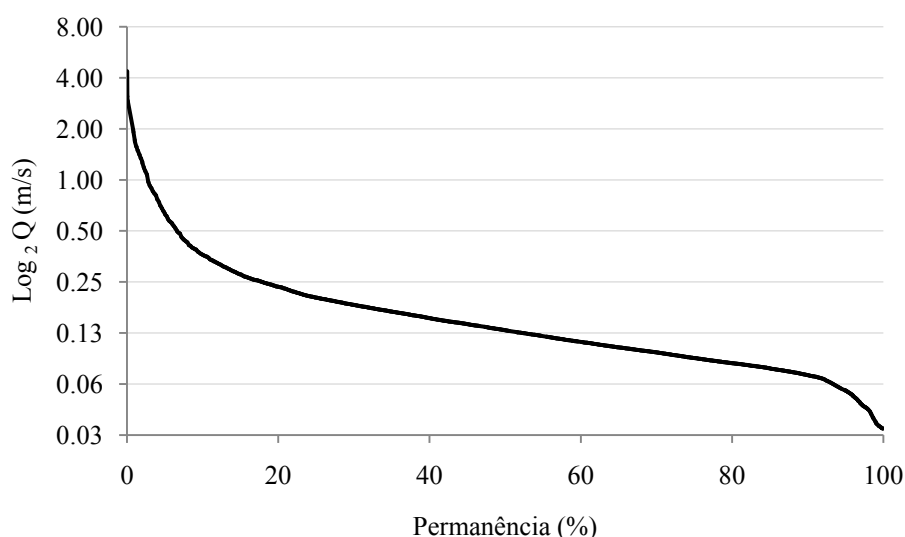
Mês	Vazões simuladas	Molinete	Resíduos (m³/s)
Janeiro	0,40	0,24	0,15
Fevereiro	0,23	0,25	0,02
Março	0,30	0,17	0,13
Abril	0,16	0,17	0,01
Mai	0,13	0,18	0,05
Junho	0,11	0,16	0,05
Julho	0,10	0,14	0,04
Agosto	0,09	0,12	0,04
Setembro	0,08	0,12	0,04
Outubro	0,09	0,14	0,05

Novembro	0,13	0,16	0,03
Dezembro	0,36	0,30	0,06
RMSE = 0,07			

Apesar da diferença observada no mês de janeiro, nos outros meses do período de chuvas (como dezembro e fevereiro), houve uma expressiva redução nos resíduos para 0,06 m<sup>3</sup>/s e 0,02 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Nos períodos secos, os resíduos assumiram valores da ordem de 0,04 m<sup>3</sup>/s, contribuindo, ao final, para obtenção do RMSE igual a 0,07 m<sup>3</sup>/s. Estes valores indicam que o modelo hidrológico aplicado pode ser útil para o estudo das características do comportamento hídrico do Córrego Marinheiro, devido a seu bom desempenho. Valores semelhantes de RMSE em modelos hidrológicos que apresentaram boa performance podem ser consultados nos trabalhos realizados por Monte et al. (2016) e Machado et al.(2017).

A quantificação do tempo em que uma determinada vazão escoou pelo leito do córrego Marinheiro foi realizada por meio da curva de permanência de vazões, que indica a frequência em que uma vazão pode ser igualada ou excedida. Pelos valores apresentados, verifica-se que a vazão em 90% do tempo foi igual ou superior a 0,07 m<sup>3</sup>/s (fluxo de base) e em 10% do tempo ela foi igual ou superior a 0,36 m<sup>3</sup>/s (eventos de cheias) (Figura 5).

Figura 5 – Curva de permanência de vazões do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG

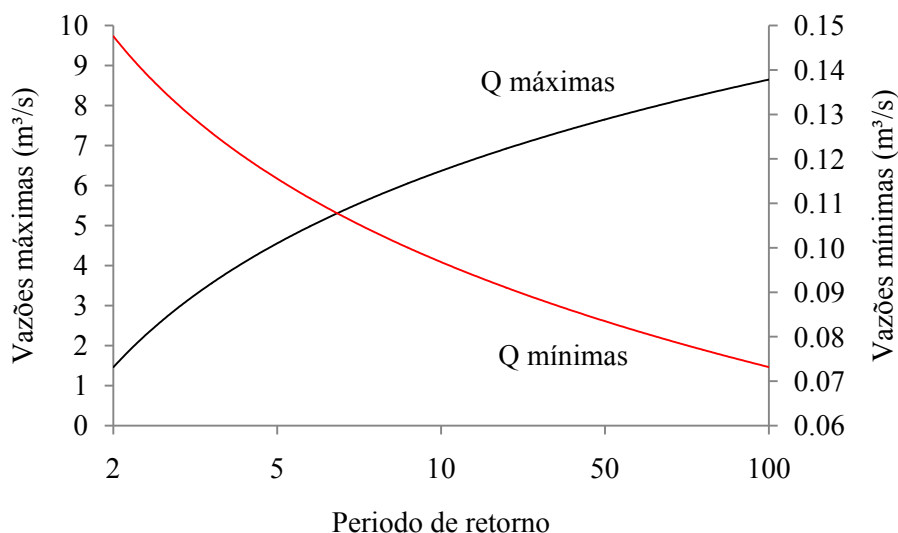


A diferença acentuada entre as vazões de cheia e as vazões de fluxo de base pode indicar baixa capacidade para manutenção do volume de água que é escoado no leito do

córrego durante o ano, comprometendo a oferta de água nos meses mais secos. Além disso, essa baixa capacidade de armazenamento pode ser explicada tanto pelas características litológicas no qual a bacia hidrográfica se encontra (carste), quanto pelas captações que são realizadas no seu curso d'água.

Além da curva de duração, as estimativas do período de retorno de vazões máximas e mínimas também podem ilustrar o panorama hidrológico atual e futuro do Córrego Marinheiro, permitindo a realização de planejamento de uso e gestão de seus recursos (Figura 6).

Figura 6 – Tempo de retorno das vazões máximas e mínimas na bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG



De acordo com o gráfico, é possível observar que em períodos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos, as vazões máximas podem corresponder a 2,26; 3,81; 5,0; 8,07; e 9,54 m³/s, respectivamente. Já as vazões mínimas podem corresponder a 0,13; 0,12; 0,09; 0,08 e 0,06 m³/s, respectivamente. É importante ressaltar que os valores das vazões máximas, com períodos de retorno acima de 50 anos, devem ser considerados em planejamentos na área, pois elas possuem grande potencial para causar danos e comprometer estruturas, como barramentos e pontes. As vazões mínimas, com os mesmos períodos de retorno (acima de 50 anos), também devem ser consideradas, pois podem caracterizar situações de severa escassez de água na área e comprometimento da disponibilidade hídrica, bem como o estabelecimento de potenciais conflitos pelo uso da água.

Para que não haja conflitos pelo uso da água e, ao mesmo tempo, seja garantida uma vazão mínima necessária no leito do córrego de modo que ele possa desempenhar sua função ecológica, a agência Estadual mineira (IGAM) utiliza algumas vazões de referência nos processos de concessão de outorgas, as quais foram comparadas com as vazões obtidas na modelagem hidrológica realizada para a área de estudo (Tabela 2).

Tabela 2 – Comparação entre as vazões de referência (em m<sup>3</sup>/s) modeladas e utilizadas pelo IGAM na bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG.

Vazões de referência	Modelo	IGAM	$\Delta Q$
Q <sub>7,10</sub>	0,045	0,029	0,016
Q <sub>mld</sub>	0,210	0,493	-0,283
Q <sub>90</sub>	0,071	0,075	-0,004
Q <sub>95</sub>	0,057	0,056	0,001

Destaca-se o maior valor para a diferença entre a Q<sub>mld</sub> modelada e a regionalizada, que pode ser explicada pelo fato da hidrografia regionalizada do IGAM considerar mais corpos hídricos dentro da bacia do que o foi modelado e visualizado *in loco*.

Assim, ao aumentar o número de trechos na bacia hidrográfica, aumentam-se os valores das vazões de referência da área e, por ser parte de uma regionalização para todo o Estado, os valores de referência podem estar sendo superestimados.

Já o valor superior de Q<sub>7,10</sub> modelado, em detrimento do regionalizado, indica que a manutenção do fluxo de base na bacia sofre maior influência de variáveis físicas, como litologia e solos, do que a pressuposta no método de regionalização.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A série sintética de vazões obtidas por meio da modelagem hidrológica realizada no software JAMS J2000 poderá ser utilizada para subsidiar planejamentos e estudos ambientais, com base nos resultados dos resíduos e no RMSE apresentados. Ressalta-se o potencial do modelo em representar, principalmente, as vazões de base dos meses mais secos do ano.

As vazões de referência modeladas apresentaram resultados próximos das vazões regionalizadas utilizadas pelo Estado para gestão dos recursos hídricos. No entanto, as



diferenças entre as  $Q_{mld}$  indicam o efeito da generalização, ao se utilizar dados modelados para todo o território mineiro em bacias de pequena escala. Naquelas que estejam sob intenso uso de recursos hídricos e em regiões populosas, sugere-se o acréscimo de novas análises locais, acrescentando considerações sobre os aspectos físicos do ambiente como formação geológica, tipo de solos e relevo.

Por fim, as informações contidas neste estudo também evidenciam o potencial do uso de softwares livres na obtenção de respostas hidrológicas, o que pode ser um fator de economia, principalmente para os órgãos gestores públicos. É importante destacar que o nível de detalhamento da base cartográfica precisa estar diretamente relacionado com a escala da área de interesse, principalmente, ao se estudar bacias de pequena escala.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Minas Gerais e ao Laboratório de Solos e Meio Ambiente, do Instituto de Geociência da UFMG, pelo apoio de pessoal e infraestrutura para realização deste trabalho. À FAPEMIG pelo apoio financeiro ao projeto CRA- APQ-03178-13.

À Universidade de JENA (Alemanha) pelo treinamento na utilização do software JAMS J2000, à EMBRAPA Milho e Sorgo e a EMBRAPA Solos pelo apoio técnico e teórico, ao departamento e Engenharia da UFMG pelo apoio técnico.

## 5. REFERENCIAS

AKGIRAY, Ö. Simple formulae for velocity, depth of flow, and slope calculations in partially filled circular pipes. **Environmental Engineering Science**, v. 21, n. 3, p. 371-385, 2004.

BANCO DE DADOS METEOROLÓGICOS PARA ENSINO E PESQUISA, INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - BDMEP/INMET. **Banco de dados históricos de estações climáticas.** Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: Mar, 2017.

CAMPOS, J. A., ROLIM, F. E., ZANANDREA, F., DORNELLES, F., e GOLDENFUM, J. A. Avaliação de metodologias de extrapolação superior de curva-chave: estudo de caso no Rio Tubarão-SC. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (22.: Florianópolis, 2017). **Anais.** Porto Alegre: ABRH, 2017.

CHANG, J., WANG, Y., ISTANBULLUOGLU, E., BAI, T., HUANG, Q., YANG, D., e HUANG, S. Impact of climate change and human activities on runoff in the Weihe River Basin, China. **Quaternary International**, v. 380, p. 169-179, 2015.

COSTA, T. C. e C. da; SILVA, A. F.; OLIVEIRA, L. M. T. D.; VIANA, J. H. M. **Probabilistic classification of tree and shrub vegetation on phytogeographicsystem.** Journal of Environmental Science and Engineering B. Libertyville, v, 4, n, 6:315-330,2015.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Mapas Temáticos de Geologia, Geomorfologia, Hidrologia, Solos e Uso dos Solos do Projeto Vida, escala 1:50,000. Belo Horizonte, 1997.

COOMES, O. T., LAPOINTE, M., TEMPLETON, M., e LIST, G. Amazon river flow regime and flood recessional agriculture: Flood stage reversals and risk of annual crop loss. **Journal of Hydrology**, v. 539, p. 214-222, 2016.

DURU, U.; ARABI, M.; WOHL, E. E. Modeling stream flow and sediment yield using the SWAT model: a case study of Ankara River basin, Turkey. **Physical Geography**, p. 1-26, 2017.

FLUGEL, W. A. Hydrological Response Units (HRU) as modelling entities for 28 hydrological river basin simulation and their methodological potential for modelling 29 complex environmental process systems- Results from the Sieg catchment. **Die Erde**, v, 127, p, 42-62, 1996.

HANNAH, D. M.; DEMUTH, S.; VAN LANEN, H. A.; LOOSER, U.; PRUDHOMME, C., REES, G., ...e TALLAKSEN, L. Large-scale river flow archives: importance, current status and future needs. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 7, p. 1191-1200, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING) versão 5.4.3.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2016. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.html>>. Acesso em 23 nov, 2016.

JACCON, G.; CUDO, K. J. Hidrologia-curva-chave: análise e traçado. Brasília: DNAEE, 273 p., 1989.

KRAUSE, P. **Das hydrologische Modellsystem J2000: Beschreibung und Anwendung in groen Flueinzugsgebieten.** Schriften des Forschungszentrum Jülich, Reihe Umwelt/Environment; Band 29, 2001.

KRAUSE, P. **Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the J2000 model.** Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, v, 27, n, 9-10, p, 663-673, 2002.

MACHADO, A. R.; JUNIOR, M.; VIEIRA, A.; e WENDLAND, E. C. J2000/JAMS model evaluation for Brazilian watersheds hydrological simulation. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, n, AHEAD, p, 0-0, 2017.

MONTE, B. E. O.; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHÃES, L. D. O. e UVO, C. B. Hydrological and hydraulic modelling applied to the mapping of flood-prone areas. **RBRH**, v, 21, n, 1, p, 152-167, 2016.

- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. **Hidrologia estatística**. CPRM, 2007.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. **Journal of hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.
- NEPAL, S.; FLÜGEL, W-A.; SHRESTHA, A. B. Upstream-downstream linkages of hydrological processes in the Himalayan region. **Ecological Processes**, v. 3, n. 1, p. 19, 2014.
- OLIVEIRA, A.R. Relações solo-paisagem e modelo de predição de solos da bacia do córrego marinheiro, Sete Lagoas (MG). Dissertação de mestrado, Belo Horizonte, IGC/UFMG, 74 p, 2016.
- PFENNIG, B.; WOLF, M. Extraction of process - based topographic model units using SRTM elevation data for Prediction in Ungauged Basins (PUB) in different landscapes, In: KULASIRI, D.; OXLEY, L. (Ed.), THE MODSIM 2007 INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION, 2007. Christchurch, **Proceedings**, New Zealand: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand , 2007, p, 85-691.
- SAMPAIO, J. D.; SILVA, S. A. M.; VIANA, J. H. M. V. Mapa litológico preliminar da bacia do córrego Marinheiro. Belo Horizonte: [s.d.], 2016. Mapa litológico. Arquivos vetoriais armazenados em memória flash portátil. Não publicado.
- SANTOS, R. M. B.; FERNANDES, L. S.; MOURA, J. P.; PEREIRA, M. G.; e PACHECO, F. A. L. The impact of climate change, human interference, scale and modeling uncertainties on the estimation of aquifer properties and river flow components. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 1297-1314, 2014.
- SCOLFORO, J. R.; MELLO, J. M.; SILVA, C. P. de C. (Ed.), **Inventário Florestal de Minas Gerais: Floresta Estacional Semidecidual e Ombrófila - Florística, Estrutura, Diversidade, Similaridade, Distribuição Diamétrica e de Altura, Volumetria, Tendências de Crescimento e Áreas aptas para o Manejo Florestal**. Lavras: UFLA, 2008, cap, 5, p, 255-335.
- SILVINO, A, N, D, O.; SILVEIRA, A., MUSIS, C, R, D.; WYREPKOWSKI, C, C.; e CONCEIÇÃO, F, T, D. Determinação de vazões extremas para diversos períodos de retorno para o Rio Paraguai utilizando métodos estatísticos. **Geociências**, v, 26, n, 4, 2007, p, 369-378, Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/106947>>. Acesso em nov, 2017.
- ŠIMŮNEK, J., ŠEJNA, M., SAITO, H., SAKAI, M., & VAN GENUCHTEN, M. T. The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 4.0: HYDRUS Software Series 3. **Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA**, v. 315, 2008.
- VOGEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. Flow duration curves II: a review of applications in water resources planning. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v, 31, n, 6, p, 1029-1039, 1995.

## **CONCLUSÃO GERAL**

O objetivo principal desta dissertação foi alcançado, o de gerar informações que subsidiem planos e estudos hidrológicos na bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro. Apesar das dificuldades devido às características físicas e ambientais da área e à falta de dados de monitoramento, ressalta-se a importância de se integrar as geotecnologias nesse processo obtenção de dados, a fim de embasar as orientações de planejamento, prevenção e gestão ambiental local, principalmente, por ser uma área de importância ecológica e por estar vulnerável à expansão urbana.

Considerando a escala de trabalho, o uso de softwares livres como o JAMS J2000, O SPRING e o QGIS demonstraram-se viáveis, do ponto de vista operacional e econômico, permitindo que recursos sejam destinados à melhoria das bases cartográficas e no aumento do número de atividades de campo para validação *in loco*.

Com a calibração para a área de contribuição na bacia hidrográfica do Ribeirão Jequitibá, foi possível transferir o modelo para outras bacias hidrográficas da região e compreender a dinâmica hídrica de outros cursos d'água de pequeno porte, mas que são relevantes para a ecologia fluvial local, como o Córrego Marinheiro, e assim obter informações detalhadas de um maior número de áreas e geri-las de forma sustentável.

A modelagem e caracterização de vazões do Córrego Marinheiro sugerem um baixo fluxo médio anual de vazões na área devido ao porte da bacia hidrográfica, as suas características físicas e a possíveis captações de água em seus trechos. Por isso, a destinação da área para expansão urbana e a implantação de novas atividades antrópicas locais, deverá ter seus impactos precisamente mensurados, com base na modelagem realizada e, em caso comprometimento o curso d'água, as ações deverão ser planejadas novamente (ou até mesmo abolidas) para que esse escasso e importante curso de água superficial não seja extinto.

Sugere-se a realização de trabalhos que mensurem as consequências hidrológicas das alterações do uso e cobertura do solo no local. Estimando, quais os efeitos na disponibilidade hídrica ocorrerão em diferentes cenários.