

## **REGIME DE RECARGA SUBTERRÂNEA NATURAL NAS BACIAS DOS PRINCIPAIS MANANCIAIS DE ABASTECIMENTO DE JUIZ DE FORA**

*Natural groundwater recharge scheme in the basins of the main water supply sources of Juiz de Fora*

Nicolas da Rocha Pires<sup>1\*</sup>

Celso Bandeira de Melo Ribeiro<sup>2</sup>

### **RESUMO**

Com o desenvolver da sociedade, a necessidade do uso de recursos hídricos aumentou e, portanto, a gestão destes se tornou imprescindível para evitar escassez de água em uma dada região. Esse trabalho se propõe a avaliar as taxas de Recarga Natural da Água Subterrânea em três mananciais do Rio Paraibuna (as sub-bacias da Barragem de Chapéu D’Uvas, do Ribeirão Espírito Santo e do Ribeirão dos Burros, que juntos abastecem cerca de 90% da cidade de Juiz de Fora) utilizando o modelo hidrológico SWAT com o amparo da extensão QSWATMOD, no QGIS, a qual cria o vínculo dos processos de águas superficiais e subterrâneas. Dos resultados, vê-se que a sub-bacia do Ribeirão dos Burros possui a maior taxa de recarga média em milímetros e a sub-bacia da Barragem de Chapéu D’Uvas possui a menor. Verifica-se, também, a variação sazonal da recarga nas três sub-bacias, como esperado para a região de Juiz de Fora, de clima tropical de altitude, apresentando chuvas concentradas nos verões e, portanto, invernos mais secos. A segunda análise relaciona os tipos de solo, e pode-se concluir que latossolos são mais eficientes na condução de águas até uma reserva subterrânea que cambissolos, em torno de 30%. O trabalho apresenta resultados passíveis de discussão com setores públicos sobre a administração e gestão dos recursos hídricos da região e serve de base para a evolução do modelo das sub-bacias estudadas e abre caminho para um modelo com valores mais refinados, tornando o valor obtido ao final mais preciso.

Palavras-chave: Recarga subterrânea. Rio Paraibuna. QSWATMOD.

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) – e-mail: [nicolas.pires@engenharia.ufjf.br](mailto:nicolas.pires@engenharia.ufjf.br). \*Autor correspondente.

<sup>2</sup> Doutorado em recursos hídricos pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (DEA/UFV). Mestrado em recursos hídricos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (PEC/COPPE/UFRJ). Graduação em Engenharia Civil pela UFJF. Professor Associado no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFJF – e-mail: [celso.bandeira@ufjf.edu.br](mailto:celso.bandeira@ufjf.edu.br).

## ABSTRACT

*As society has developed, the need for water resources has increased, therefore, its management has become vital to avoid water scarcity in a given region. This work intends to evaluate natural groundwater recharge rates of three tributaries of Paraíba River (the sub-basin of Chapéu D'Uvas Dam, Espírito Santo Stream and Burros Stream, which together supply water to up to 90% of the town of Juiz de Fora) using the SWAT hydrological model, helped by QSWATMOD extension on QGIS, which combines superficial and underground water processes. As result, it was observed that Burros Stream sub-basin had the largest average recharge rate in millimeters, and Chapéu D'Uvas Dam, the smallest one. The seasonal variation of the three sub-basins recharge was noticed, as expected, given the tropical high-altitude climate of the region, that consists in intense rain in the summertime and dryer winters. The second analysis compares the two types of soils and concludes that Ferralsol is around 30% more efficient to conduce water to groundwater reservoir than Cambisols. This work not only presents some results that can be discussed with the public sector concerning the management of water resources in the region, but also provides basis for the upgrade in the studied sub-basins models, clearing the path for new ones with more precise values, making the final result more accurate.*

**Keywords:** Groundwater recharge. Paraíba River. QSWATMOD.

Data de submissão: 30/10/2021

Data de aprovação: 19/04/2022

## 1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolver da sociedade, a necessidade do uso de recursos hídricos aumentou e, portanto, a gestão dos mesmos se tornou imprescindível para evitar escassez de água em uma dada região. O Brasil é um dos países que apresenta uma das maiores disponibilidades hídricas (13,8%) de toda a água doce do planeta e grande parte está reservada como águas subterrâneas, estima-se que cerca de 112.000 km<sup>3</sup> com profundidade de até 1.000m com volume de reabastecimento de 3.500 km<sup>3</sup> por ano (BRASIL, 2007 *apud* REBOUÇAS; BENEDITO; TUNDISI, 1997). Ainda é possível dizer que o uso de água subterrânea é bastante amplo no Brasil, de acordo com o Plano Nacional de Águas Subterrâneas (PNAS), 55% dos distritos são abastecidos por água subterrânea. O PNAS ainda expõe os perigos da superexploração de água subterrâneas, a qual “pode provocar a redução da quantidade de água que abastece os rios, a seca de nascentes, o esgotamento dos reservatórios, entre tantos outros impactos negativos” (BRASIL, 2007). O documento ressalta, em seguida, a importância dos estudos sobre as características de aquífero que devem ser desenvolvidos para melhor compreendê-los. Um dos temas citados é o

foco deste trabalho, a recarga natural.

A avaliação de dados de recarga natural, proposta neste trabalho, é realizada com a utilização de modelos digitais que acabam por considerar diferentes parâmetros como a topografia, dados pluviométricos, incidência solar, variação de temperatura, uso e tipo de solo. Sendo uma das recomendações do trabalho de Vasconcelos *et al.* (2013, p. 34) os quais escrevem que:

Muitas das técnicas de diagnóstico e mapeamento atuais utilizadas nas políticas ambientais e de meio ambiente apresentam visões compartimentadas e estáticas de um ambiente. A circulação hídrica subterrânea, pela recarga e descarga de aquíferos, pode, pois, demonstrar relações topológicas espaço-temporais entre os elementos do ambiente, integrando ecossistemas, geossistemas, bem como o uso do solo e da água.

A recarga natural é dividida em dois tipos: direta e indireta. Definidas, respectivamente, por Barreto (2010) como: a quantidade de água adicionada ao reservatório de água subterrânea, resultante da percolação vertical da precipitação através da zona não saturada, descontando-se os déficits de umidade do solo e da evapotranspiração; e a quantidade de água que infiltra e atinge o lençol freático, proveniente de poças, em áreas de topografia mais baixas do terreno, também referida como recarga localizada, ou também, infiltração que ocorre como consequência do escoamento superficial, a partir dos cursos d'água, através dos sedimentos de fundo de canais e lagos. Existem, portanto, duas categorias de recarga indireta, sendo uma associada a cursos d'água superficiais e outra resultante de concentrações de água em superfícies planas, onde inexistem corpos d'água bem definidos (recarga localizada).

Esse trabalho tem como objetivo avaliar as taxas de recarga natural da água subterrânea nas bacias de contribuição de três dos principais mananciais de abastecimento da cidade de Juiz de Fora (MG), localizada na Bacia Hidrográfica dos Rios Preto e Paraibuna, que por sua vez compreendem afluentes da margem esquerda do rio Paraíba do Sul. Para isso, será utilizado o modelo hidrológico SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*), que simula o balanço hídrico nas bacias de contribuição - parametrizando as características físicas e meteorológicas, como o uso e ocupação do solo, pluviosidade e topografia - e gera o fluxo de água acima do solo de recarga dos aquíferos. Por fim, com o amparo da extensão QSWATMOD, no QGIS, criar-se-á o vínculo dos processos de águas superficiais e subterrâneas, e os dados a serem analisados para se estimar os valores de recarga subterrânea nas regiões de estudo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A associação de dois programas para a avaliação de regimes de aquíferos é um tema estudado ao decorrer das últimas décadas em trabalhos como Aliyari et al. (2019), Chkara e El Morabiti (2016), Kim *et al.* (2008), Chunn *et al.* (2019), Ehtiat *et al.* (2018), Bailey *et al.* (2016) e Guzman et al. (2012).

O trabalho de Bailey *et al.* (2017) vai ainda além criando uma interface chamada de SWATMOD-Prep para auxiliar na criação de um sistema acoplado onde os dados provenientes dos programas MODFLOW ou ModelMuse, por exemplo, seriam utilizados como uma sub-rotina dentro do próprio SWAT, gerando dados mais realísticos da influência entre águas superficiais e subterrâneas. Mais recentemente, há a tese de doutorado de Park (2018) que desenvolveu a ferramenta QSWATMOD para auxiliar na redução dos possíveis erros que ocorrem ao criar modelos através do SWATMOD-Prep. Esse programa funciona como uma extensão do QGIS.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Área de estudo

O trabalho foca na Região da Bacia Hidrográfica dos Rios Preto e Paraibuna, definida com a sigla PS1 pela Circunscrição Hidrográfica (CH) que está inserida na Unidade Estratégica de Gestão (UEG) dos Afluentes do Rio Paraíba do Sul, em sua margem esquerda. De acordo com o Plano de Recursos Hídricos (PRH) da Bacia, ela abrange uma área da ordem de 7.199 km<sup>2</sup> e apresenta uma população em torno de 637.000 habitantes, os quais habitam 30 municípios, sendo que as sedes de 22 estão dentro dos limites da bacia (IGAM, 2021). O Rio Paraibuna é o maior afluente do Rio Paraíba do Sul apresentando vazão média de 179 m<sup>3</sup>/s.

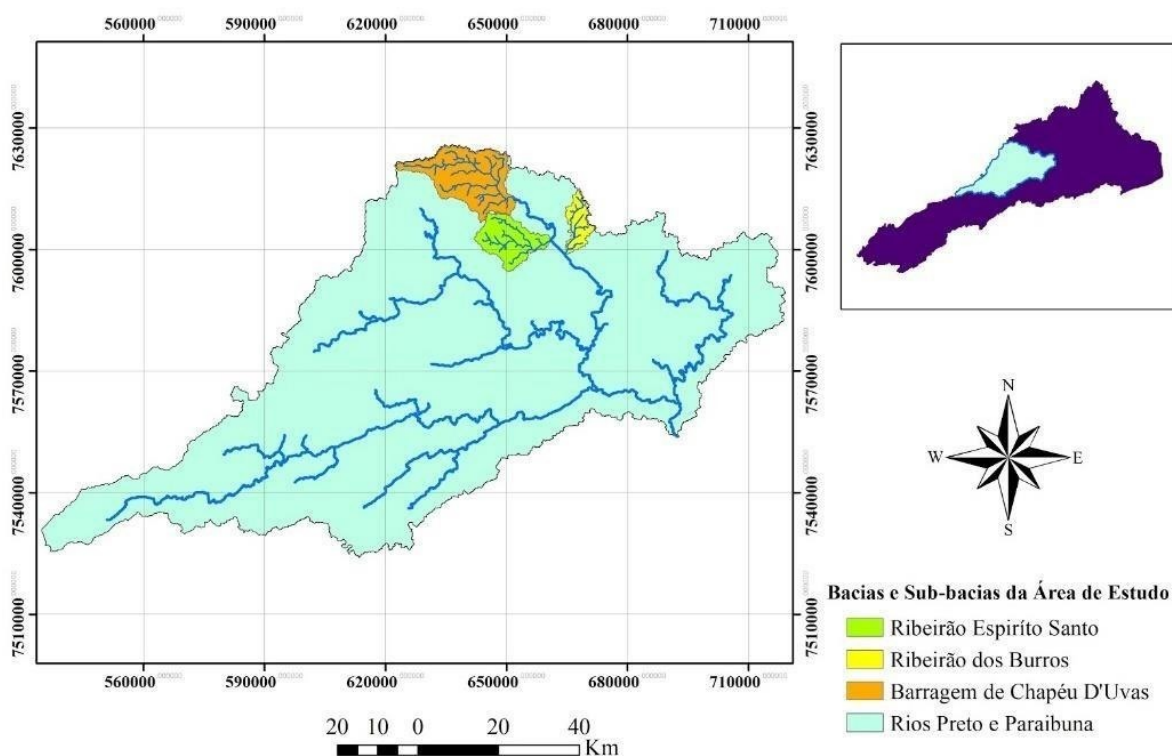
Quanto a disponibilidade de águas subterrâneas, que carecem de monitoramento nessa bacia, o PRH (Plano de Recursos Hídricos) descreve que:

A vazão máxima explotável, esperada na operação continuada de poços profundos na região, varia entre 18 m<sup>3</sup>/h e 90 m<sup>3</sup>/h. Observa-se a predominância de áreas com águas de boa qualidade para abastecimento público (mais de 90%) e em alguns trechos da região mineira da bacia encontram-se águas com qualidade inferior, porém toleráveis para o abastecimento público. (FUNDAÇÃO COPPETEC, 2006, p.79).

E conclui discorrendo sobre a necessidade de um conhecimento mais detalhado de toda a hidrogeologia da área de estudo, além do monitoramento devido para controlar os níveis e a qualidade da água subterrânea da região.

O estudo é realizado nas sub-bacias de três dos principais mananciais do Rio Paraíba, que são formados pela Barragem de Chapéu D'Uvas, pelo Ribeirão Espírito Santo e do Ribeirão dos Burros, onde se encontra a represa de João Penido. Esses podem ser vistos no Mapa 1 e, juntos, abastecem cerca de 90% da cidade de Juiz de Fora.

Mapa 1 – Localização das sub-bacias dos três mananciais (Chapéu d'Uvas, Ribeirão Espírito Santo e Ribeirão dos Burros) de estudo em relação à bacia dos rios Preto e Paraíba e à bacia do rio Paraíba do Sul



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Na Tabela 1, podem ser vistas algumas informações sobre as sub-bacias estudadas, disponibilizadas pela Companhia de Saneamento Municipal (CESAMA, 2021).

Tabela 1 – Dados das sub-bacias de estudo

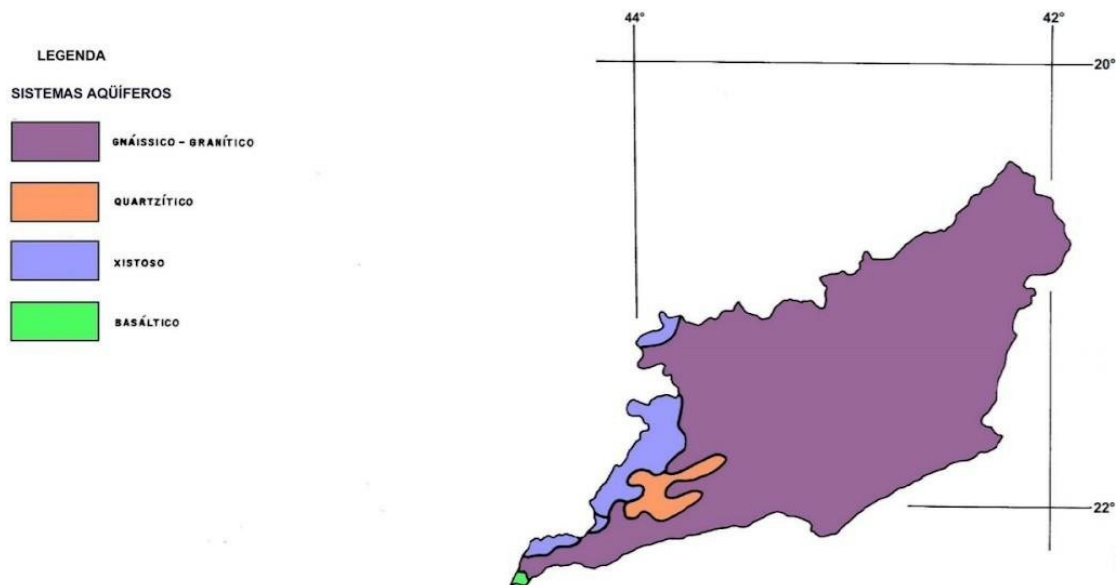
Sub-bacia	Barragem de Chapéu D’Uvas	Ribeirão Dos Burros	Ribeirão Espírito Santo
<b>Volume (mt)</b>	146.000.000	16.000.000	-
<b>Área de contribuição (km²)</b>	313	68	147,8
<b>Espelho d’água (km²)</b>	12	-	-

Fonte: Adaptado de CESAMA (2021)

### 3.2 Geologia da região

O Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul, que abrange os 4 estados da Região Sudeste do Brasil, faz algumas considerações quanto a ocorrência de água subterrânea do trecho mineiro, as formas geológicas do mesmo, e define a “predominância da formação geológica do tipo gnáissico-granítico em toda a área (cerca de 85% de área), com existência de áreas constituídas pelas formações geológicas dos tipos xistoso, quartzítico e basáltico”. O Mapa 2, retirado do próprio Plano, mostra a distribuição dessas formações geológicas.

Mapa 2 – Mapa geológico da área de estudo



Fonte: FUNDAÇÃO COPPETEC (2006)

### 3.3 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

O SWAT é um acrônimo para ferramenta de avaliação de solo e águas desenvolvido nos anos 90 pelo Dr. Jeff Arnold. De acordo com o manual, o SWAT considerado um modelo de base física (utilizadas informações específicas como clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de gestão do solo), semi-distribuído (variação espaço-temporal) e de tempo contínuo (produção a longo prazo) (NEITSCH *et al.*, 2009). E, por essas características, é capaz de simular o impacto a longo prazo das atividades humanas na região.

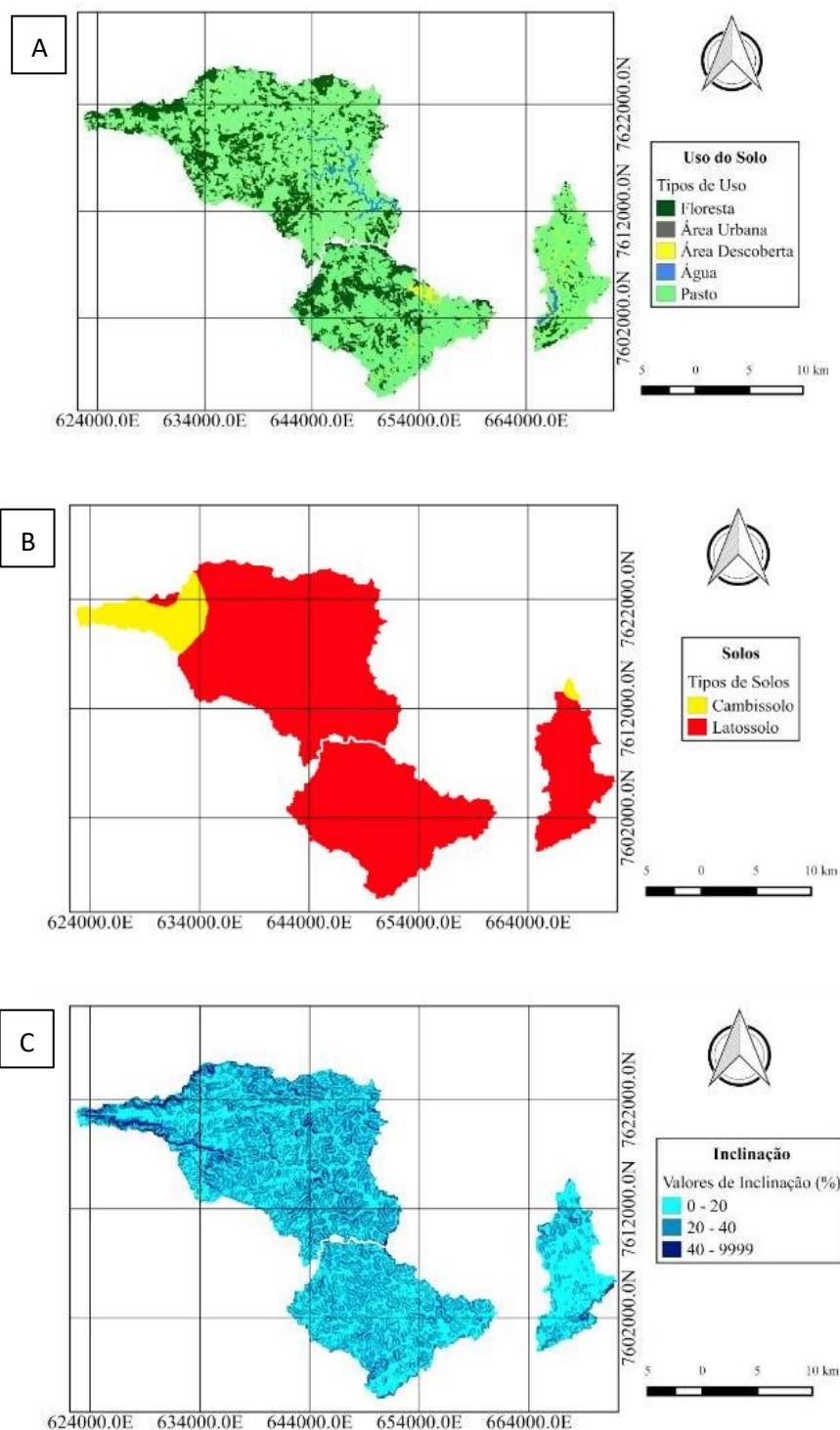
#### 3.3.1 Dados de entrada

No modelo SWAT, foi necessário parametrizar os dados climáticos, uso e tipo de solo, além do modelo digital de elevação (MDE). O produto escolhido para o uso neste trabalho é o HydroSHEDS (*Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales*), produzido em uma parceria entre o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e o programa de ciência da conservação do Fundo Mundial da Vida Selvagem (WWF) e tem resolução espacial de 90 metros.

Os dados de Uso e Ocupação do Solo foram extraídos de imagens de LANDSAT referentes ao ano de 2015 e o mapa com os tipos de solo baseado no novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2005). Podem ser vistos no Mapa 3A, os diferentes tipos de uso e ocupação do solo. No Mapa 3B são apresentados os tipos de solos encontrados na região, os quais são predominantemente latossolos com pequenas ocorrências de cambissolo. Por fim, o Mapa 3C apresenta a declividade, dividida em três níveis de inclinação que podem ser vistos na imagem abaixo.



Mapa 3 – Características de solo e topografia da área de estudo



Legenda: (A) Uso do solo  
 (B) Tipo de solo  
 (C) Declividade da área de estudo  
 Fonte: Elaborado pelos autores (2021)



Com os três mapas gerados, pode-se seguir para a entrada de dados climáticos. Após a inserção dos dados, foi iniciada a simulação para um período de 32 anos, sendo os dois primeiros utilizados como aquecimento do modelo. Na Tabela 2 pode ser visto um resumo das características das bacias em relação aos três itens citados anteriormente.

Tabela 2 – Distribuição por área das propriedades: declividade, uso de solo e tipo de solo

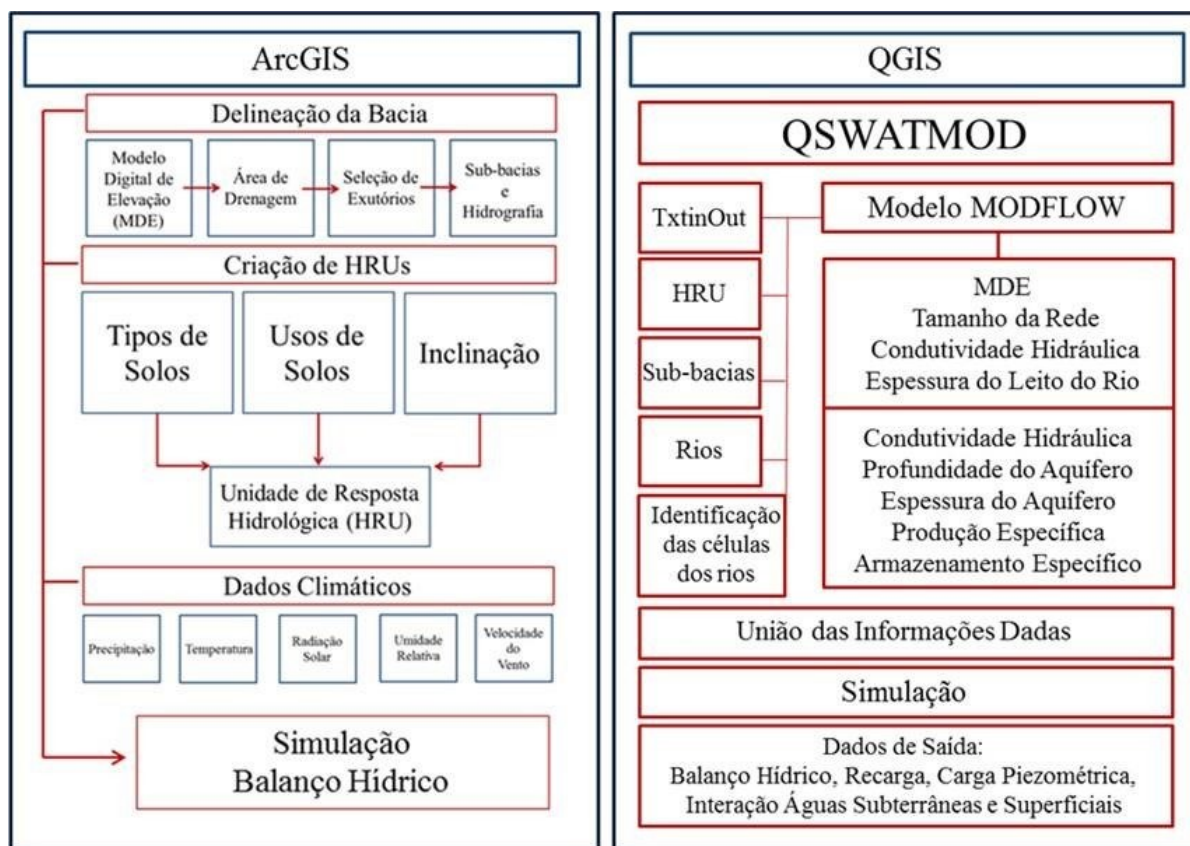
		<i>Área (ha)</i>					
<i>Sub-bacia</i>		<i>Barragem Chapéu D'Uvas</i>		<i>Ribeirão Espírito Santo</i>		<i>Ribeirão dos Burros</i>	
<i>Área total</i>		28.096,70		14.337,40		6.202,13	
<i>Tipo de uso do solo</i>	<i>Floresta</i>	7.418,59	26,40%	3.942,88	27,50%	561,75	9,06%
	<i>Água</i>	599,26	2,13%	4,08	0,03%	150,02	2,42%
	<i>A. descoberta</i>	343,25	1,22%	398,69	2,78%	234,81	3,79%
	<i>Área urbana</i>	5,71	0,02%	51,37	0,36%	14,68	0,24%
	<i>Pasto</i>	19.729,90	70,22%	9.940,37	69,33%	5.240,87	84,50%
<i>Tipo de solo</i>	<i>Latossolo</i>	24.371,51	86,74%	14.337,4	100,00%	6.017,87	97,03%
	<i>Cambissolo</i>	3.725,19	13,26%	0,00	0,00%	184,26	2,97%
<i>Inclinação (%)</i>	<i>0 - 20</i>	12.939,11	46,05%	6.273,88	43,76%	4.503,82	72,62%
	<i>20 - 40</i>	13.399,76	47,69%	7.846,63	54,73%	1.601,29	25,82%
	<i>40 - 9999</i>	1.757,83	6,26%	216,87	1,51%	97,02	1,56%

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

### 3.3.2 Aplicação do modelo

O programa pode se associar com diferentes sistemas de informação geográfica como ArcView, QGIS e ArcGIS. Nesse trabalho, ele apresenta interface com o ArcGIS 10.1. No Fluxograma 1, podem ser vistos os procedimentos utilizados, desde a primeira etapa até a simulação.

## Fluxograma 1 – Usos dos softwares



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

### 3.4 Uso do QSWATMOD

Após a finalização do modelo SWAT, os resultados foram incorporados ao QGIS para continuar o processo de modelagem das águas subterrâneas. O QSWATMOD é uma extensão para QGIS que une os modelos SWAT e MODFLOW, no entanto, a própria extensão tem um criador de modelo similar ao MODFLOW, porém executado pela FloPy3. Nesse modelo mais simples formado por apenas uma camada de características homogêneas, definiu-se os valores de parâmetros que podem ser vistos na Tabela 3 para todas as três sub-bacias.

Quatro dados de saída do SWAT foram copiados para a extensão QSWATMOD, sendo eles a pasta TxtInOut e os arquivos em Shapefile de HRU, Sub-bacias e Rios. Em seguida, o modelo MODFLOW é implementado, no entanto, caso não exista, o programa cria um modelomais rústico, com apenas uma camada de material, utilizando dados do Modelo Digital de Elevação e de informações fornecidas pelo próprio usuário como, tamanho das células na malha que será criada, condutividade hidráulica e espessura do material formador do leito do rio.

Por fim, como pode ser visto na Tabela 3, pede-se informações que podem ser importadas em formato de mapa ou de valor único para as características de condutividade hidráulica do solo da bacia, profundidade e espessura do aquífero, além dos valores para produção e armazenamento específico.

Tabela 3 – Distribuição por área das propriedades: declividade, uso de solo e tipo de solo

<i>Parâmetros</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valores</i>
<i>Dimensões da rede (malha)</i>	<i>m x m</i>	<i>100 x 100</i>
<i>Condutividade hidráulica do material do leito do rio</i>	<i>m/dia</i>	<i>0,1</i>
<i>Espessura do leito do rio</i>	<i>m</i>	<i>0,1</i>
<i>Espessura do aquífero</i>	<i>m</i>	<i>20</i>
<i>Condutividade hidráulica</i>	<i>m/dia</i>	<i>1</i>
<i>Armazenamento específico</i>	<i>l/m</i>	<i>0,00001</i>
<i>Produção específica</i>	<i>-</i>	<i>0,2</i>
<i>Profundidade do aquífero</i>	<i>m</i>	<i>4</i>

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

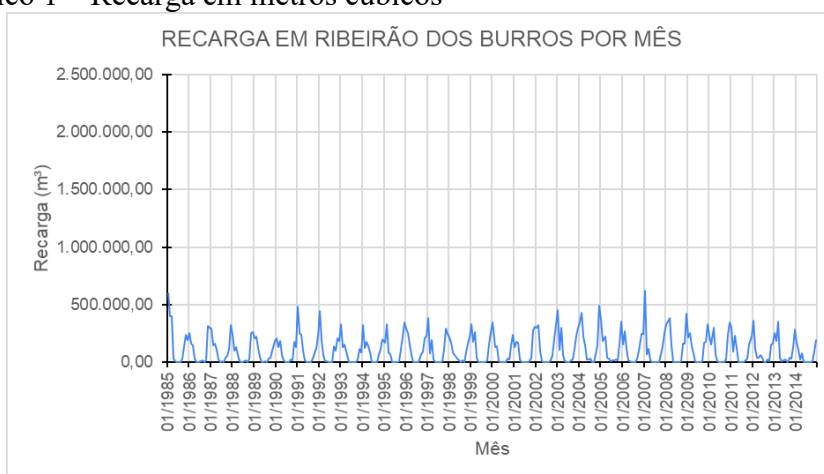
Com os passos anteriores completados, o programa, então, identifica as células dos rios através do modelo SWAT, do modelo MODFLOW ou da união dos dois. Com os dados gerados pelo QSWATMOD, estabelece-se quais são os critérios a serem avaliados como dados de saída e o programa vai rodar uma nova simulação seguindo o formato do SWAT, porém criando uma sub-rotina que lida com águas subterrâneas. Ao fim dessa etapa, a aba de pós-processamento é liberada e obtêm-se os valores de recarga nas áreas de estudo, o objetivo deste trabalho.

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

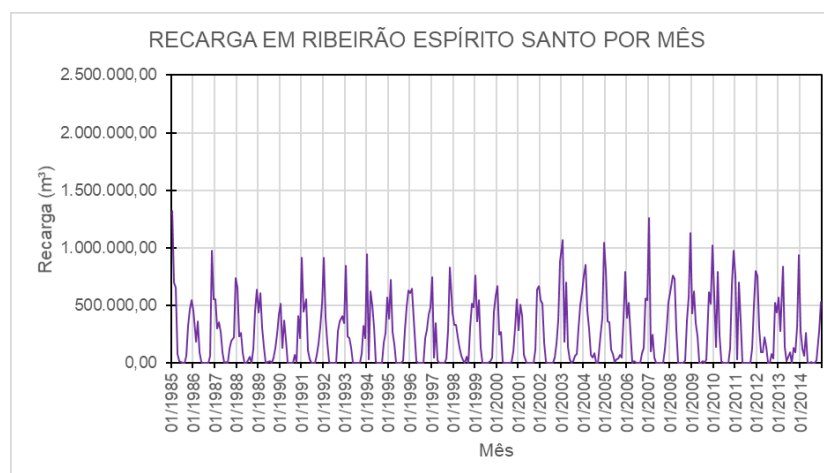
Com o modelo rodado, os dados de recarga das três sub-bacias foram gerados com dados referentes a todos os meses entre janeiro de 1985 e dezembro de 2014, totalizando 30 anos no modelo e, portanto, 360 meses (GRÁFICO 1 A, B, C).

Gráfico 1 – Recarga em metros cúbicos

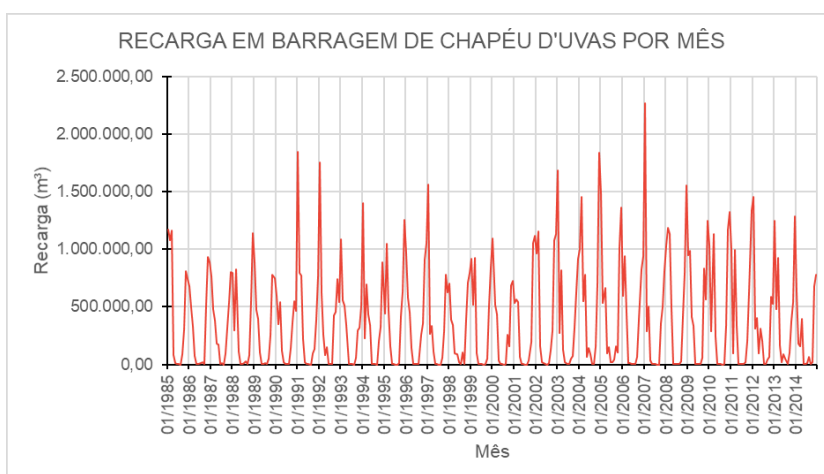
A



B



C



Legenda: Sub-bacia Ribeirão dos Burros (A)

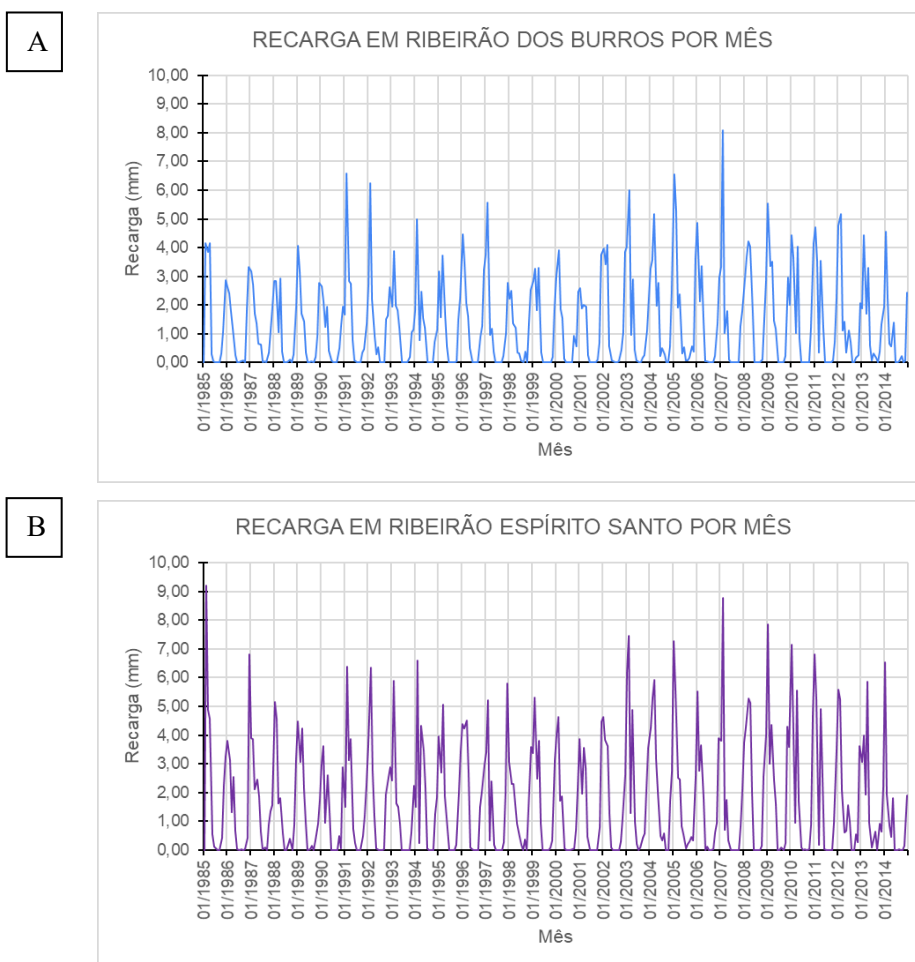
Sub-bacia Ribeirão Espírito Santo (B)

Sub-bacia Barragem de Chapéu D'Uvas (C)

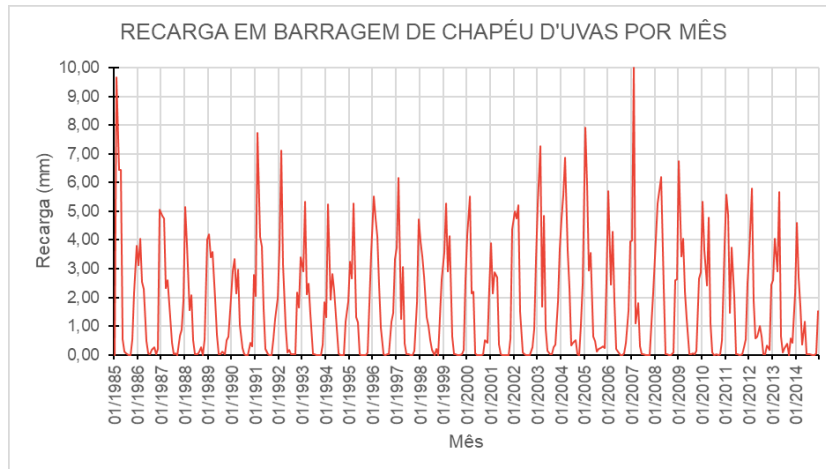
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Plotados todos os 360 valores de recarga mensais e mantidos os valores máximos dos eixos, percebe-se um valor maior na Barragem de Chapéu d’Uvas, em média de 379.582,39 m<sup>3</sup>/mês, isso se dá pela sua área ser muito maior que a das outras sub-bacias (cujos valores de recarga médios em m<sup>3</sup>/mês são 107.238,11 e 246.897,93 para as sub-bacias de Ribeirão dos Burros e Ribeirão Espírito Santo, respectivamente). De forma a corrigir essa distinção causada pela área, divide-se a recarga pela mesma e encontra-se o valor de recarga específica, em unidades de coluna d’água. O Gráfico 2 (A, B, C) apresentam as recargas específicas, em milímetros de coluna d’água por mês.

Gráfico 2 – Recarga específica em milímetros



C

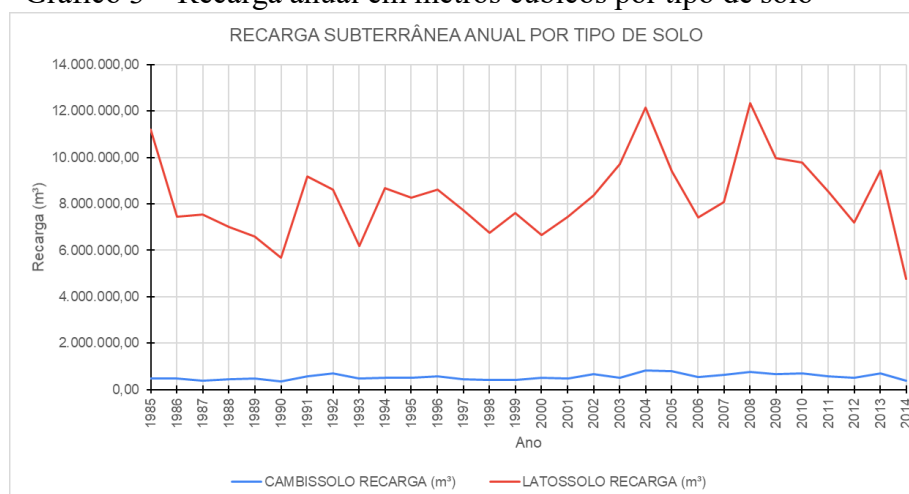


Legenda: Sub-bacia Ribeirão dos Burros (A)  
 Sub-bacia Ribeirão Espírito Santo (B)  
 Sub-bacia Barragem de Chapéu D'Uvas (C)  
 Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Ao observar os gráficos gerados pelas recargas específicas, no Gráfico 2, percebe-se que a sub-bacia de Ribeirão dos Burros possui a maior taxa de recarga média mensal (1,73mm) e a sub-bacia da Barragem de Chapéu D'Uvas possui a menor (1,35mm), a sub-bacia do Ribeirão Espírito Santo tem uma taxa média mensal de 1,72mm. Verifica-se, também, a variação sazonal da recarga nas três sub-bacias, como esperado para a região de Juiz de Fora, de clima tropical de altitude, apresentando chuvas concentradas nos verões e, portanto, invernos mais secos.

A segunda análise realizada trata dos tipos de solos existentes nas sub-bacias, latossolo e cambissolo, e como eles influenciam na recarga subterrânea (GRÁFICO 3).

Gráfico 3 – Recarga anual em metros cúbicos por tipo de solo



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Como os valores apresentados são influenciados pela área total dos solos que compõem o território de estudo, e buscando representar o comportamento da sub-bacia de forma mais concisa, optou-se por calcular uma relação entre o valor médio das recargas anuais e a proporção da área de cada solo em relação ao valor total. Conseqüentemente, pode-se definir em qual tipo de solo a recarga ocorre com mais intensidade.

O parâmetro de eficiência é a razão entre a porcentagem de contribuição da média das recargas anuais de cada solo em relação ao total anual dividida pela porcentagem da área superficial destes mesmo solos em relação à área total. Essas análises podem ser vistas na Tabela 4 apresentada abaixo.



Tabela 4 – Comparação dos tipos de solo

<i>Média das recargas anuais (m<sup>3</sup>)</i>		
<i>Latossolo</i>	8.277.181,17	93,71%
<i>Cambissolo</i>	555.713,01	6,29%
<i>SOMA</i>	8.832.894,18	100,00%
<i>Área (ha)</i>		
<i>Latossolo</i>	44.726,78	91,96%
<i>Cambissolo</i>	3.909,45	8,04%
<i>SOMA</i>	48.636,23	100,00%
	<i>Eficiência de recarga</i>	<i>Recarga (m<sup>3</sup>/ano*ha)</i>
<i>Latossolo</i>	1,02	185
<i>Cambissolo</i>	0,78	142

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Outra forma de se expressar a eficiência de recarga dos solos é pela média de recarga anual por hectare, no qual o latossolo obteve o resultado de 185 m<sup>3</sup>/ha, e o cambissolo; 142 m<sup>3</sup>/ha. Essa característica pode estar relacionada à capacidade de drenagem desses dois tipos de solo. Como disposto no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos desenvolvido em parceria com a Embrapa, latossolos apresentam estágio de intemperização avançado e são destituídos de minerais primários e secundários, mas que concentram relativo teor de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (SANTOS *et al.*, 2018). Este último metal favorece a aglutinação das partículas, ou seja, seu concrecionamento. Como consequência, a estrutura do solo apresenta mais macroporos e o torna bem drenado. No caso dos cambissolos, por serem uma classificação referente a um estágio de transformação dos solos, sua capacidade de drenagem pode ser muito variável, indo de fortemente a imperfeitamente drenados. Um estudo mais aprofundado sobre as propriedades geológico-geotécnicas do cambissolo de estudo deve ser realizado para uma conclusão mais acurada da razão deste cambissolo, em particular, apresentar valores menores de recarga quando comparado ao latossolo.

O município de Juiz de Fora não apresenta nenhum plano de gestão ou controle do uso de águas subterrâneas, apesar do uso por sua população. Sabendo a taxa de recarga dos aquíferos das regiões de maior abastecimento do município, o comitê gestor responsável pelo

Plano de Recursos Hídricos das bacias dos Rios Preto e Paraibuna podem estabelecer metas para a preservação dos aquíferos e limites de uso pela população.

Para evitar que o consumo sem controle acarrete o esgotamento dos recursos ao longo dos próximos anos, é necessário um estudo mais aprofundado pelo setor público, com análise de poços de monitoramento que demonstrem o comportamento das águas subterrâneas nas regiões de estudo. Os dados obtidos por análises de campo podem ser adicionados ao modelo apresentado neste trabalho, refinando-o e resultando em dados de saída mais precisos.

## 5 CONCLUSÃO

O trabalho apresenta resultados passíveis de discussão com setores públicos sobre a administração e gestão dos recursos hídricos da região. Como exposto no decorrer deste trabalho, a bacia hidrográfica na qual se encontram as sub-bacias do Espírito Santo, Ribeirão dos Burros e Barragem de Chapéu D'Uvas não tem plano de gestão de águas subterrâneas, ainda que o uso das mesmas seja explorado pela comunidade que nelas habitam.

Com base nos resultados analisados pode-se concluir que a sub-bacia de Ribeirão dos Burros apresenta maior taxa de recarga específica mensal média, da ordem de 1,73mm/mês e a sub-bacia da Barragem de Chapéu D'Uvas apresentou a menor taxa de recarga específica mensal, da ordem de 1,35mm/mês. Os solos do tipo latossolo representaram recarga anual de 185 m<sup>3</sup>/ha, enquanto o solo do tipo cambissolo representou 142 m<sup>3</sup>/ha de toda a capacidade de recarga.

Sabendo o valor de recarga das sub-bacias estudadas, o setor público pode tomar providências e investir na criação de um plano de consumo consciente de água subterrânea no município de Juiz de Fora. Como ainda não existe o controle da exploração desse recurso nesse município, apesar do uso pela população, é possível que, no futuro, o consumo ultrapasse o valor de recarga, esgotando o volume total armazenado.

Em suma, este trabalho serve de base para a evolução do modelo das sub-bacias estudadas e apresenta apenas uma pequena parte dos estudos de águas subterrâneas que podem ser amplamente expandidos com dados de entrada mais refinados, tornando o valor obtido ao final mais preciso e conciso com a realidade.

## REFERÊNCIAS

- ALIYARI, F. *et al.* Coupled SWAT-MODFLOW model for large-scale mixed agro-urban river basins. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdam, v. 115, n.3, p. 200-210, maio 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.02.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815218302780>. Acesso em: 28 out. 2021.
- BAILEY, R. T. *et al.* Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. **Hydrological Processes**, Germany, v. 30, n. 23, p. 4420-4433, jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.10933>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.10933>. Acesso em: 28 out. 2021.
- BAILEY, R. T. *et al.* SWATMOD-Prep: graphical user interface for preparing coupled SWAT-MODFLOW simulations. **Journal of the American Water Resources**, Germany, v. 53, n. 2, p. 400-410, fev. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12502>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1752-1688.12502>. Acesso em: 28 maio 2022.
- BARRETO, A. B. da C. **Avaliação de recarga e sustentabilidade de recursos hídricos subterrâneos de uma micro-bacia usando modelagem numérica**. 2010. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: [https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/16715/16715\\_1.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/16715/16715_1.PDF). Acesso em: 28 out. 2021.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Águas subterrâneas: um recurso a ser conhecido e protegido**. Brasília: MMA, 2007 *apud* REBOUÇAS, A. C.; BENEDITO, B.; TUNDISI, J.G. **Águas doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Ed. Escrituras, 2000.
- CHKARA, I.; EL MORABITI, K. The estimation of groundwater recharge by using surface-subsurface hydrological model. *In*: IAH INTERNATIONAL CONGRESS, 43., 2016, Montpellier. **Anais [...]**. Montpellier, set. 2016. Anais “Groundwater and society: 60 years of IAH”. Disponível em: [https://www.cfh-aih.fr/images/DOCS/2-Colloques/Colloque\\_2016\\_Montpellier/1392.pdf](https://www.cfh-aih.fr/images/DOCS/2-Colloques/Colloque_2016_Montpellier/1392.pdf). Acesso em: 28 maio 2022.
- CHUNN, D. *et al.* Application of an integrated SWAT-MODFLOW model to evaluate potential impacts of climate change and water withdrawals on groundwater-surface water interactions in West-Central Alberta. **Water**, Switzerland, v. 11, n.1, jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11010110>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/1/110>. Acesso em: 28 out. 2021.

COMPANHIA DE SANEAMENTO MUNICIPAL (CESAMA). **Barragem de Chapéu D'Uvas**. Juiz de Fora: CESAMA, 2021. Disponível em: <http://www.cesama.com.br/mananciais/barragem-de-chapeu-d-uvvas-2>. Acesso em: 25 out.2021.

EHTIAT, M.; MOUSAVI, S. J. ; SRINIVASAN, R. Groundwater modeling under variable operating conditions using SWAT, MODFLOW and MT3DMS: a catchment scale approach to water resources management. **Water Resources Management**, Switzerland, v. 32, n. 1, p. 1631-1649, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1895-z>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/322307397\\_Groundwater\\_Modeling\\_Under\\_Variable\\_Operating\\_Conditions\\_Using\\_SWAT\\_MODFLOW\\_and\\_MT3DMS\\_a\\_Catchment\\_Scale\\_Approach\\_to\\_Water\\_Resources\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/322307397_Groundwater_Modeling_Under_Variable_Operating_Conditions_Using_SWAT_MODFLOW_and_MT3DMS_a_Catchment_Scale_Approach_to_Water_Resources_Management). Acesso em: 28 out. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Descrição das principais classes de solos**. Recife: UEP Recife, 2005. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/157911/descricao-das-principais-classes-de-solos>. Acesso em: 28 maio 2022.

FUNDAÇÃO COPPETEC. **Plano de recursos hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul – resumo**: diagnóstico dos recursos hídricos: relatório final. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC, 2006. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/downloads/PSR-010-R0.pdf>. Acesso em: 28 out. 2021.

GUZMAN, J. A. *et al.* A model integration framework for linking SWAT and MODFLOW. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdam, v. 73, p. 103-116, nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815215300372>. Acesso em: 28out. 2021.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DE ÁGUAS (IGAM). **Bacia Hidrográfica dos Rios Preto e Paraibuna (PS1)**. Belo Horizonte: IGAM, 2021. Disponível em: <http://comites.igam.mg.gov.br/conheca-a-bacia-ps1>. Acesso em: 25 out. 2021.

KIM, N. W. *et al.* Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 356, n. 1-2, p. 1-16, jul. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.024>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/222299682\\_Development\\_and\\_application\\_of\\_the\\_integrated\\_SWAT-MODFLOW\\_model](https://www.researchgate.net/publication/222299682_Development_and_application_of_the_integrated_SWAT-MODFLOW_model). Acesso em: 28 out. 2021.

NEITSCH, S.L. *et al.* **Ferramentas de avaliação de solo & água**: documentação teórica. Texas: Laboratório de Pesquisa de solo e água Grassland, Serviço de Pesquisa Agrícola, 2009. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/99193/swat2009-theory-portuguese.pdf>. Acesso em: 28 out.2021.

PARK, S. **Enhancement of coupled surface/subsurface flow models in watersheds: analysis, model development, optimization, and user accessibility**. 2018. 114 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 2018. Disponível em: <https://mountainscholar.org/handle/10217/193164>. Acesso em: 28 out. 2021.

REBOUÇAS, A. C.; BENEDITO, B.; TUNDISI, J.G. **Águas doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Ed. Escrituras, 2000.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 28 maio 2022.

VASCONCELOS, V. *et al.* Recarga de aquíferos: epistemologia e interdisciplinaridade. **INTERthesis**, Florianópolis, v. 10, n. 2, dez. 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/277712925\\_Recarga\\_de\\_Aquiferos\\_epistemologia\\_e\\_interdisciplinaridade](https://www.researchgate.net/publication/277712925_Recarga_de_Aquiferos_epistemologia_e_interdisciplinaridade). Acesso em: 28 out. 2021.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Federal de Juiz de Fora pela bolsa concedida para a realização desse projeto.