



Quantificação do potencial hídrico subterrâneo do baixo curso do Rio Piracicaba (MG): Interação das águas subterrâneas e superficiais

Karen Quintão Castro¹; José Augusto Costa Gonçalves²

¹Mestra em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), kakaqcastro@hotmail.com.

²Professor Associado do Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá-Campus de Itabira-MG, jaucosta@unifei.edu.br (autor correspondente).

^{1,2}Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira, Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, CEP 35903-087 - Itabira - Minas Gerais
Artigo recebido em 13/02/2022 e aceito em 20/06/2022

RESUMO

A demanda por recursos hídricos é um processo que anda em sentido contrário a quantidade e qualidade apresentada pela maioria dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos. Este trabalho tem como objetivo a caracterização e avaliação do potencial hídrico subterrâneo, com base nas características geológicas e hidrogeológicas do baixo curso do Rio Piracicaba. O estudo dos poços perfurados e das vazões outorgadas, permitiu a caracterização dos aquíferos. A quantificação das componentes superficiais e subterrâneas, reproduzidas por meio de hidrogramas, possibilitaram os cálculos das contribuições dos aquíferos para a perenicidade dos cursos d'água, mediante avaliação dos volumes referentes ao deflúvio total e ao deflúvio subterrâneo. O método utilizado para representar o escoamento total correspondente ao deflúvio dos rios e o deflúvio subterrâneo se deu a partir da construção de hidrogramas, que é a representação gráfica da variação da vazão (Q) ao longo do tempo (t) em uma seção do curso d'água. Das sete cidades que constituem a área de estudo, apenas Jaguaraçu não utiliza das águas subterrâneas para abastecimento público. Foram cadastrados 1275 poços que estão assentados em quatro sistemas aquíferos identificados. Metade destes poços estão perfurados no sistema aquífero fissural das rochas cristalinas. No sistema aquífero fissural e no sistema aquífero poroso são encontrados os poços com as maiores vazões de captação. Estimativas realizadas considerando o aumento populacional, correlacionado com a demanda hídrica regional, para o ano de 2035, mostram que será necessário uma nova e eficiente gestão dos recursos hídricos subterrâneos capaz de atender as necessidades de um futuro próximo.

Palavras-chave: Aquíferos; Fluxo de Base; Gestão de Recursos Hídricos.

Quantification of the underground water potential of the lower Piracicaba River (MG): Interaction of groundwater and surface water

Abstract

The demanda for water resources is a process that goes against the quantity and quality presented by most surface and underground water bodies. This work aims to characterize and evaluate the underground water potential, based on the geological and hydrogeological characteristics of the lower course of the Piracicaba River. The study of the wells drilled and the flows granted allowed the characterization of the aquifers. The quantification of surface and underground components, reproduced by means of hydrographs, made it possible to calculate the contributions of aquifers to the perenicity of water courses, by evaluating the volumes referring to the total runoff and the underground runoff. The method used to represent the total flow corresponding to the river runoff and the underground runoff was based on the construction of hydrographs, which is the graphic representation of the flow variation (Q) over time (t) in a section of the course of water. Of the seven cities that make up the study area, only Jaguaraçu does not use groundwater for public supply. 1275 wells were registered, which are seated in four identified aquifer systems. Half of these wells are drilled in the fissure aquifer system of crystalline rocks. In the fissure aquifer system and in the porous aquifer system, the wells with the highest uptake rates are found. Estimates made considering the population increase, correlated with regional water demand, for the year 2035, show that a new and efficient management of groundwater resources will be necessary, capable of meeting the needs of the near future.

Keywords: Aquifers; Base Flow; Water Resources Management.

Introdução

Os recursos hídricos constituem um dos mais importantes bens naturais existentes, sendo fundamentais para a manutenção da vida, construção da sociedade e para o desenvolvimento socioeconômico. É elemento indispensável para o abastecimento público, irrigação agrícola, saneamento básico, meio de transporte, geração de energia e processos produtivos. A maior parte da superfície terrestre é coberta pelas águas, em abundância, tendo uma distribuição desigual e o recurso já é escasso em diversos lugares do planeta (ANA, 2018).

O planeta Terra é constituído por massas de água que compõem a hidrosfera terrestre. As águas salgadas, presentes em mares e oceanos correspondem a 97,4 % do total, entretanto, inapropriadas para consumo direto. Já as águas doces próprias para consumo humano totalizam 2,6% da água terrestre, distribuídas nas calotas polares, aquíferos, rios, lagos, lagoas e áreas alagadas (ANA, 2013).

Os diversos usos dependentes de água e o desenvolvimento socioeconômico ocasionaram a diminuição da disponibilidade de água per capita, além da deterioração da qualidade desta. O cenário atual de escassez hídrica vivenciado por diversas partes do mundo trouxe à tona conflitos pela quantidade e qualidade da água disponível, visto que a quantidade é fundamental para a manutenção da vida e atividades, enquanto a qualidade irá influenciar o livre consumo, os processos produtivos e as atividades de lazer.

O ciclo hidrológico é marcado pelo fluxo das águas entre os oceanos, a atmosfera e os continentes. Nos continentes as águas se apresentam nos cursos de águas superficiais e nos aquíferos, reservatórios de águas subterrâneas. Estes compartimentos da hidrosfera, estabelecem entre si, relações de fluxos de água de acordo com a sazonalidade. No período de estiagem, os aquíferos contribuem para o abastecimento dos cursos d'água, enquanto no período de maior quantidade de chuva, o processo de infiltração atua como a recarga dos aquíferos (Alagna et al., 2016; Maharjan e Donovan, 2016).

As reservas de águas subterrâneas podem apresentar caráter permanente ou renovável. As permanentes são as situadas abaixo do nível freático de variação sazonal, enquanto as renováveis correspondem ao volume de água variável pela sazonalidade. Essas reservas influenciam diretamente no volume de escoamento dos rios, por meio da contribuição de

volumes de água ao longo do ano hidrológico (ANA, 2018).

Com o incremento da demanda, o grau de contaminação, e o custo elevado de tratamento das águas superficiais, o uso das águas subterrâneas tem aumentado. Atualmente mais da metade da população brasileira já é abastecida por águas de fontes subterrâneas (ANA, 2019); o que torna o gerenciamento deste recurso necessário e urgente, a fim de evitar o uso insustentável, incontrolável e predatório, como se deu com as águas superficiais.

Contudo, a água subterrânea é gerenciada por um sistema ainda precário frente ao aumento do uso que vem sendo apresentado. Faz-se necessária a gestão integrada das águas subterrâneas e superficiais conjuntamente, visto que, a água é uma só, em estados e processos diferentes em movimento contínuo entre a atmosfera, superfície terrestre e oceanos (Santos e Koide, 2016). Buscando uma melhor gestão para as águas subterrâneas, um estudo hidrogeológico que estime o potencial hídrico subterrâneo é primordial, pois dessa forma, torna-se possível avaliar o quantitativo das vazões a serem retiradas dos aquíferos, estabelecendo critérios que respeitem a sua renovação considerando as interações com as águas superficiais (ANA, 2013).

A região do baixo curso do Rio Piracicaba, compreende o maior aglomerado urbano de toda bacia, bem como, o maior complexo siderúrgico da América Latina, onde também se desenvolvem atividades minerárias, monocultura de eucalipto, além da pecuária. Toda a cadeia produtiva para o desenvolvimento das atividades econômicas locais é completamente dependente do abastecimento pelas águas subterrâneas (IGAM, 2014).

O detalhamento da hidrogeologia de uma bacia hidrográfica pode fornecer informações sobre o potencial hídrico subterrâneo, estando também diretamente associado ao comportamento da vazão de base, ou seja, o conhecimento da hidrogeologia local serve de base para se entender os rios da bacia em época de estiagem. Os estudos das relações entre as águas superficiais e subterrâneas não devem ser distintos e quaisquer modificação em um desses meios pode gerar transformações momentâneas ou até mesmo irreversíveis no outro.

O Objetivo deste trabalho é a caracterização hidrogeológica da região do baixo curso do Rio Piracicaba, visando a quantificação do potencial hídrico subterrâneo, a partir dos

dados de outorga de captações e da interação entre as águas superficiais e subterrâneas, por meio dos **Material e métodos**

Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Piracicaba, está localizada no leste do estado de Minas Gerais. A bacia está compreendida entre os meridianos de 42° 30' e 43°45' de longitude oeste do meridiano de Greenwich e entre os paralelos de 19°15' e 20°15' de latitude sul. O Rio Piracicaba nasce no município de Ouro Preto, a 1680 m de altitude, seguindo na direção leste por 241 km, até desaguar no Rio Doce na área urbana da cidade de Ipatinga, a uma altitude de 210 m. É composta pelas sub-bacias dos rios Conceição, São João, Peixe, Santa Bárbara, Maquiné, Una, Prata.

O rio Piracicaba é o curso principal da bacia, recebendo descarga dos rios das sub-bacias do rio do Peixe e do rio Santa Bárbara, pela margem esquerda, e pela sub-bacia do rio da Prata, pela margem direita. Além desses, ao longo do seu curso, afluem quase uma centena de córregos e ribeirões, os quais compõem sua rede de drenagem (Gonçalves et al., 2019).

processos de fluxos efluentes dos aquíferos para a perenização dos deflúvios superficiais.

Inserida totalmente no estado de Minas Gerais, a bacia abrange 21 municípios, sendo eles: Alvinópolis, Antônio Dias, Barão de Cocais, Bela Vista de Minas, Bom Jesus do Amparo, Catas Altas, Coronel Fabriciano, Ipatinga, Itabira, Jaguarauçu, João Monlevade, Mariana, Marliéria, Nova Era, Ouro Preto, Rio Piracicaba, Santa Bárbara, Santana do Paraíso, São Domingos do Prata, São Gonçalo do Rio Abaixo e Timóteo.

A população é de aproximadamente 733.360 habitantes em toda bacia, e a região conhecida como Vale do Aço, no baixo curso do Rio Piracicaba, tem-se o maior adensamento populacional da bacia (ANA, 2013). A região do baixo curso do rio Piracicaba, abrange os municípios de Nova Era, Antônio Dias, Jaguarauçu, Coronel Fabriciano, Timóteo, Ipatinga e Santana do Paraíso (Figura 1). O estudo desenvolve-se em uma área de aproximadamente 2.118 km², cuja população é de 481.753 mil habitantes, abrangendo os sete municípios, (IBGE, 2010).

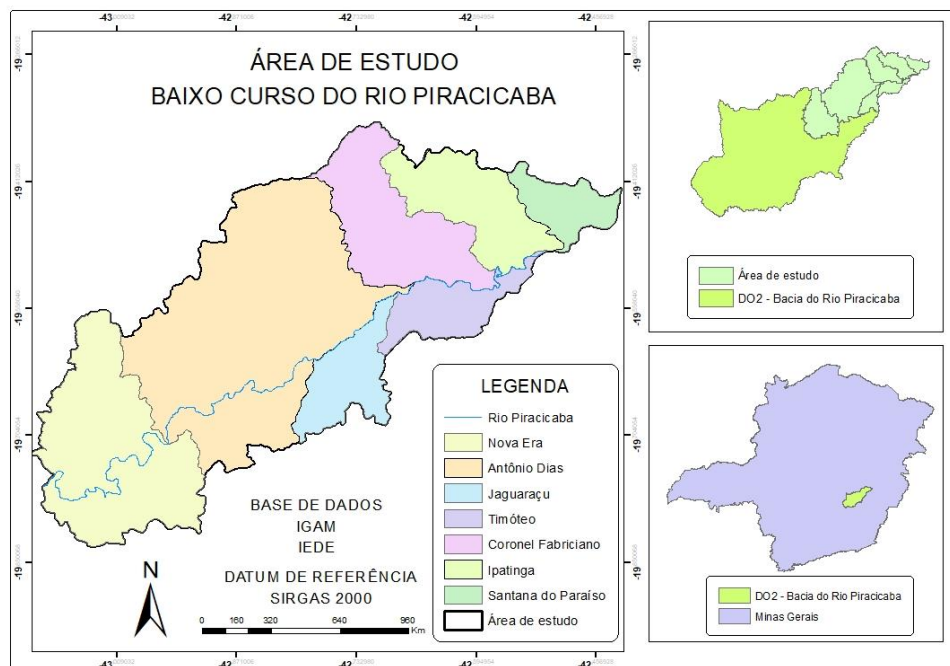


Figura 1. Localização e municípios do baixo curso do rio Piracicaba, modificado de IGAM (2017).

O rio Piracicaba tem as nascentes no município de Ouro Preto, a 1.680m de altitude. O rio Piracicaba percorre 241 km até encontrar o rio Doce; de todo esse percurso a área de estudo compreende baixo curso do rio Piracicaba, com aproximadamente 112 km de talvegue principal Castro., K., Q., Gonçalves., J., A., C.

do rio. Além do rio Piracicaba, toda a rede de drenagem da área de estudo é apresentada (Figura 2).

Em estudo realizado pelo IGAM (2017), verificou-se que o rio Piracicaba, em Antônio Dias, apresenta uma vazão média de longo termo

(Q_{MLT}) da ordem de $97,90 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo que as vazões Q_{95} e $Q_{7,10}$, são, respectivamente, $37,30 \text{ m}^3/\text{s}$ e $29,90 \text{ m}^3/\text{s}$, representando, respectivamente,

38 % e 30,5% da vazão Q_{MLT} . As maiores vazões ocorrem entre novembro e março, e menores entre abril e outubro.



Figura 2. Rede de drenagem e os municípios da área de estudo, modificado de IGAM (2017).

Segundo a classificação de Köppen a área de estudo se classifica em clima Aw, isto é, um clima tropical com inverno seco (Reboita et al., 2015). O clima da área se divide em tropical quente, com temperaturas médias maiores que $18 \text{ }^\circ\text{C}$ em todos os meses do ano, e o clima Tropical subquente, com temperaturas médias entre $15 \text{ }^\circ\text{C}$ a

$18 \text{ }^\circ\text{C}$, nos meses de inverno, (Figura 3). De outubro a março, as precipitações variam de 800 a 1.300 mm/ano , e o período seco é compreendido entre abril a setembro, com médias pluviométricas de 150 a 250 mm/ano (Reboita et al., 2015).

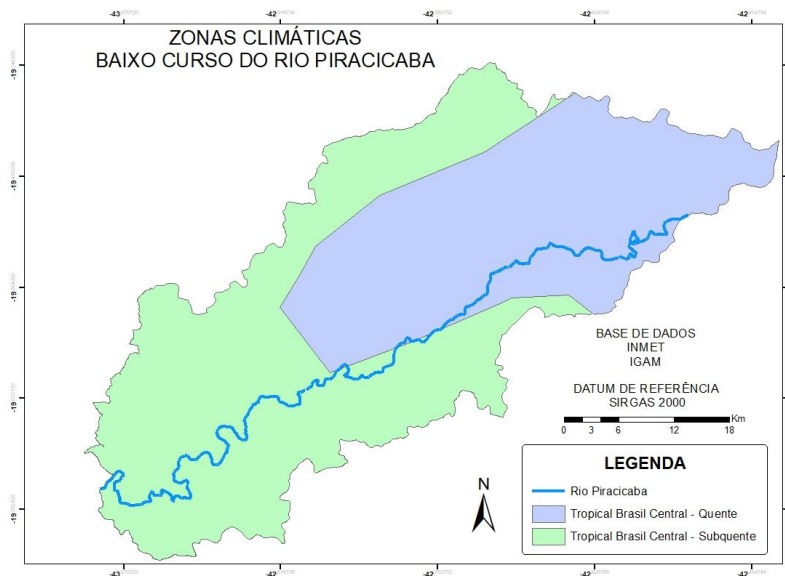


Figura 3. Mapa de tipos de climas preponderantes na área de estudo, modificado de IGAM (2021)

Regionalmente, os solos existentes nesta área, são de predominância de latossolos e Argissolos (Figura 4). Os latossolos são constituídos por material mineral, normalmente solos profundos, com horizonte B latossólicos logo abaixo do horizonte A, dentro de 200 cm a 300 cm da superfície, quando o horizonte A tem por volta de 150 cm de espessura. Latossolos vermelho-amarelos distróficos são os que apresentam coloração amarela avermelhada. Os latossolos amarelos distróficos são solos intermediários para argissolos, com coloração

amarelada, estruturas em blocos, numa faixa de 200 cm da superfície do solo. Já os latossolos vermelhos distróficos apresentam coloração avermelhada, são intermediários para argissolos também e numa faixa de 200 cm da superfície do solo (EMBRAPA, 2006). Os argissolos apresentam o incremento no teor de argila no horizonte B, apresentam profundidades variáveis, e textura variável de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte B (EMBRAPA, 2006), sempre havendo aumento de argila daquele para este.

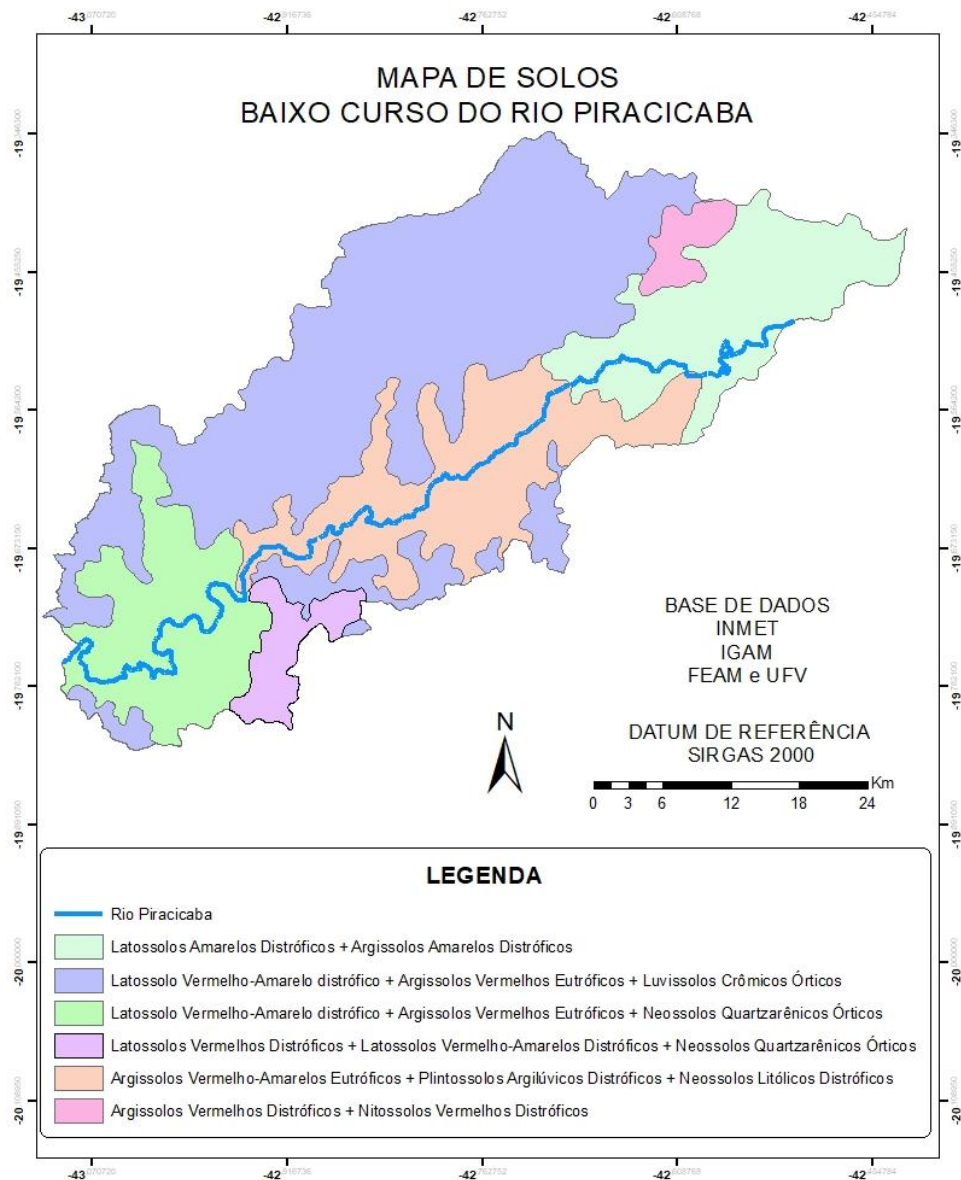


Figura 4. Mapa dos tipos de solos do baixo curso do Rio Piracicaba, IGAM (2021).

Na área de estudo, predominam os planaltos, seguidos por depressão e uma pequena área de planície, como mostra a Figura 5. Os Castro., K., Q., Gonçalves., J., A., C.

planaltos são constituídos por formas como colinas, cristas, pontões e vales, oriundos de processos de dissecação fluvial sobre rochas pré-

cambrianas, as colinas e cristas com altitudes médias entre 1000 m a 1200 m e a vales com altitude variando de 750 m a 800 m, sendo que suas formas são típicas de relevo originado de superfície de degradação (Salgado et al., 2004). A drenagem principal do rio promoveu incisão dos vales, originando as depressões e dissecando os planaltos (Salgado et al., 2004).

Já as planícies possuem uma organização alveolar, com origens nos

estreitamentos dos vales, ligados a barramentos operados por soleiras rochosas, situadas onde o substrato do embasamento foi menos profundamente intemperizado ou erodido. Quanto ao aspecto hidrográfico a região é caracterizada pela associação das planícies com duas bacias fluviais apresentando relevo plano a suave ondulado (Salgado et al., 2004).

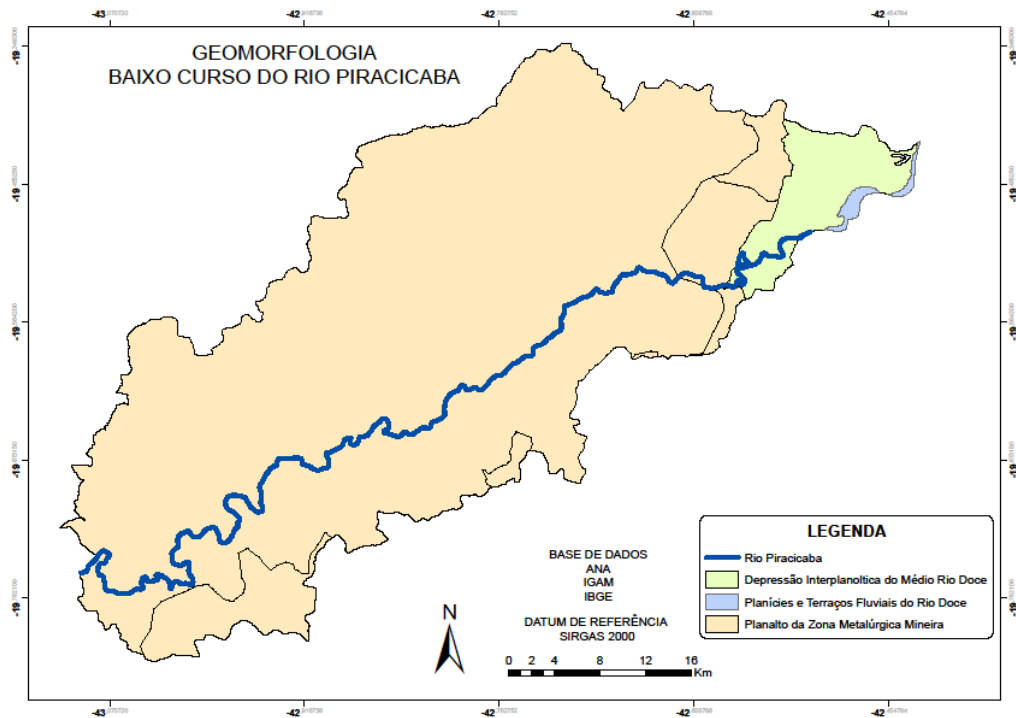


Figura 5. Formas de relevo preponderantes da área de estudo, modificado de IGAM (2021)

As rochas da Bacia do Rio Piracicaba são agrupadas em quatro formações, sendo: Complexo Granito-gnáissico (embasamento), Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi.

O Embasamento Cristalino é constituído por rochas cristalinas, com formação intrusiva, composto por rochas granito-gnaisses e migmatitos. Todas as demais formações que ocorrem na área da bacia do Rio Piracicaba com exceção a área do Quadrilátero Ferrífero estão relacionadas aos complexos cristalinos.

No Quadrilátero Ferrífero existem vários afloramentos de formações ferríferas, que são intensamente exploradas. Essas rochas de origem sedimentar (itabiritos) apresentam leitos alternados de minerais ferríferos e quartzo, sendo a hematita o principal mineral.

O território estudado, Figura 1, é recoberto por unidades litoestratigráficas do Castro., K., Q., Gonçalves., J., A., C.

Arqueano até o Cenozoico (Knauer, 2007; Jordt-Evangelista et al., 2016). As unidades arqueanas são representadas pelo Complexo Granito Gnáissico Migmatítico e Grupo Nova Lima, e as unidades proterozoica são representadas pelas rochas do Supergrupo Minas, pelas rochas máficas intrusivas, e as coberturas detríticas do Cenozoico finalizando a coluna estratigráfica local, (Neto et al., 2001).

As aluviões são depósitos sedimentos recentes, inconsolidados, constituídos por areias quartzosas de granulação fina, cascalho fluvial, argilas e siltes com ou sem contribuição orgânica, depositados em ambiente fluvial ao longo de calhas, planícies de inundação e terraços (Jordt-Evangelista et al., 2016). Também são encontrados eluviões e coluviões eventualmente associados a sedimentos aluvionares que apresentam graus variados de laterização. Trata-se de uma sucessão de arenitos argilosos e lamitos

arenosos, intercalados com camadas de argilito, folhelho orgânico e linhito de grau de pureza muito variável.

Sotopostos às coberturas detriticas cenozoicas, encontram-se as rochas da formação São Tomé, que faz parte do Grupo Rio Doce. O grupo é uma unidade metassedimentar representada por xistos e quartzitos e seus afloramentos são ricos em manganês. Os quartzitos estão interligados a xistos quartzosos; os xistos variam de biotita xistos, de ocorrência restrita e constituintes de zona de cisalhamento metabásica, e quartzos xistos com coloração avermelhada e porções esbranquiçadas. É constituída de biotita muscovita-xisto (transicionando para gnaisses xistosos), formando um importante pacote. Contém grandes filões de quartzo e notáveis corpos pegmatíticos de importância econômica (Lana et al., 2013).

Sotopostos às rochas da Formação São Tomé, encontram-se as rochas da Suíte Borrachudos, que é caracterizada por um relevo acidentado, com áreas de montanhas dissecadas e vales encaixados. São metagranitóides de granulação média à grossa, cinza, deformados com foliação marcada por biotita (Jordt-Evangelista et al., 2016).

Sotopostos a Suíte Borrachudos, encontram-se as rochas do Grupo Itabira, que está presente em pequenas porções da área de estudo, composto predominantemente por sedimentos químicos, compreendendo itabiritos, itabiritos dolomíticos e anfibolíticos (Lana et al., 2013).

Sotopostos às rochas do Grupo Itabira, encontram-se as rochas Grupo Nova Lima, de idade arqueana, é constituído por xistos e filitos de origem metassedimentar ou metavulcânica, dentre os quais se destacam quartzitos ferruginosos, formações ferríferas tipo Algoma, anfibolitos, dolomitos, metachert, metaultrabásicas e raros conglomerados (Knauer, 2007; Jordt-Evangelista et al., 2016).

O supergrupo Rio das Velhas Indiviso constitui-se de sequência metavulcanossedimentar com similaridade ao quadrilátero ferrífero, porém com metamorfismo em fácies anfibolito. São representados por formação ferrífera, quartzito, xistos e paragnaisses (Chemale et al., 2011; Almeida-Abreu e Renger, 2002). O supergrupo abrange o Grupo Nova Lima, composto por xistos metassedimentares e Grupo Maquiné, constituído de quartzitos e rochas metassedimentares, presentes na área de estudo (Jordt-Evangelista et al., 2016).

Sotopostos às rochas do Super Grupo Rio das Velhas, encontram-se as rochas O complexo Mantiqueira constitui-se de ortognaisses do tipo tonalito-granodiorio-granito, migmatizados ou não, com bandamentos com alternância de banda milimétricas a centimétricas felsicas quartzo-feldspáticas e bandas máficas ricas em biotita (Chemale et al., 2011; Almeida-Abreu e Renger, 2002).

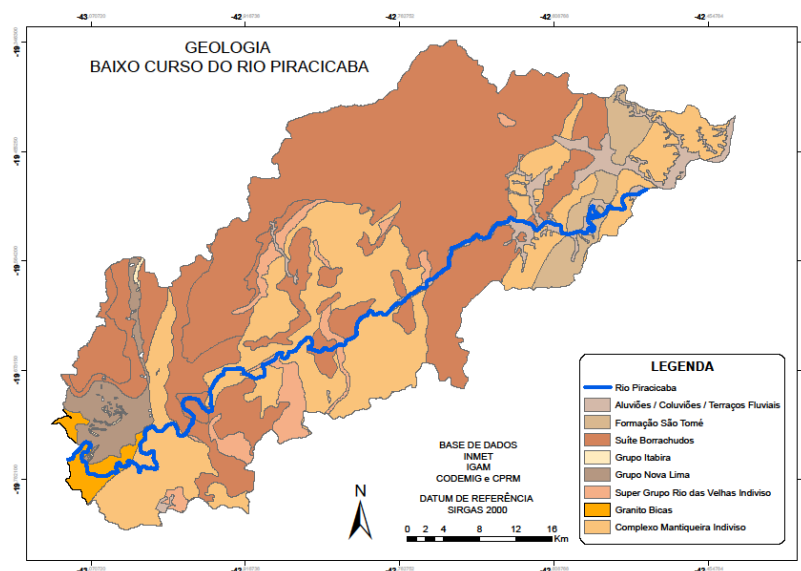


Figura 6. Mapa geológico do baixo curso do Rio Piracicaba, modificado de IGAM (2021).

Para a confecção de mapas, foi utilizado o software ArcGis versão 10.5, as bases de dados disponíveis na Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema) e diversas atividades e estudos no campo. As séries

históricas de dados fluviométricos foram obtidos de duas estações do banco de informações do Hidroweb. A escolha das estações teve como critério a maior quantidade e disponibilidade de dados consistidos e um maior período temporal de observação, Tabela 1.

Tabela 1: Identificação e localização das estações fluviométricas Fonte: SNIRH (2019).

Código	Nome	Latitude	Longitude
56674000	Guilman Amorim Nova Era	-19,7686	-43,0358
56696000	Mario de Carvalho	-19,5247	-42,6408

O inventário de poços tubulares foi elaborado a partir da base de dados do IGAM, disponível na Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema), onde tem-se os dados quantitativos sobre os poços perfurados na região de estudo.

Foram cadastrados 1275 pontos de captações de água subterrânea, obtenção de dados construtivos dos poços tubulares e informações dos aspectos geológicos e hidrogeológicos locais.

A confecção dos hidrogramas se deu a partir dos dados das estações fluviométricas (ANA, 2018) e os dados dos relatórios de poços tubulares foram obtidos do SIAGAS-Sistema de Informações de Águas Subterrâneas da Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais.

Os deflúvios superficiais de regime de escoamento permanente recebem águas do escoamento de base ou o componente subterrâneo (Baiocchi et al., 2016). Nos sistemas aquíferos, os volumes de água de entrada são iguais aos de saída, estabelecendo um equilíbrio de fluxo das águas, de forma que, o volume restituído das águas subterrâneas aos rios, é passível de cálculo, obtendo-se o volume da participação das águas subterrâneas no escoamento superficial total (Babaye et al., 2019; Baiamonte et al., 2017; Hao et al., 2018). Portanto, o armazenamento subterrâneo pode ser obtido com base no deflúvio do período de esgotamento, considerando o volume reduzido da água armazenada nos vários sistemas aquíferos da bacia, em período de déficit pluviométrico.

Nos hidrogramas, a curva de esgotamento estabelece a relação entre a carga hidráulica e a vazão transportada, e representa o período de esgotamento dos aquíferos das bacias pela redução da água armazenada. A carga hidráulica relaciona-se ao deslocamento da água

entre os depósitos subterrâneos e os canais fluviais (Dewandel et al., 2018).

A Equação 1, de Maillet (Castany, 1975), foi utilizada para a resolução da curva de esgotamento, onde:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha(t-t_0)} \quad \text{Equação 1}$$

sendo:

Q_t = vazão do curso hídrico no instante t em m^3/s ;

Q_0 = vazão do curso hídrico no instante inicial do esgotamento t_0 , em m^3/s ;

α = coeficiente de esgotamento;

t = período desde o início do esgotamento, em dias;

e = base dos logaritmos neperianos (2,71828).

A partir da expressão logarítma dos dois membros da Equação 2, tem-se o coeficiente de esgotamento (α) em:

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{0,4343t} \quad \text{Equação 2}$$

Por meio desta expressão, é possível calcular os coeficientes de esgotamento do trecho. A Equação 3 a seguir determina a capacidade de armazenamento, o volume de água subterrânea armazenado no instante t_0 , onde a curva de esgotamento se calcula em dias:

$$v = \frac{86400Q_0}{\alpha} \quad \text{Equação 3}$$

A avaliação do potencial e disponibilidade hídrica foi feita através da interação entre águas superficiais e subterrâneas quantificando os volumes pelo método gráfico mostrados a partir das componentes superficiais e subterrâneas dos hidrogramas representativos das estações fluviométricas locais, (Ohmer et al., 2017; Killian et al., 2019; Gonçalves et al., 2005).

Com base no Atlas Esgoto (ANA), foi feita a projeção de crescimento populacional dos municípios para o ano 2035 e quanto a demanda água prevista para o atendimento da população, foi tomado como base Von Sperling (1996) que diz que o consumo de água per capita (QPC) varia de acordo com a característica da comunidade e população local; seguindo os dados da Tabela 2 a seguir.

Tabela 2: Consumo de água per capita, Von Sperling (1996).

Porte da Comunidade	Faixa Populacional	Consumo Per Capita (l/hab.dia)
Povoado rural	< 5.000	90 – 140
Vila	5.000 – 10.000	100 – 160
Pequena localidade	10.000 – 50.000	110 -180
Cidade média	50.000 – 250.000	120 – 220
Cidade grande	>250.000	150 – 300

A partir dos dados supracitados na tabela, foi realizado o cálculo de demanda hídrica proveniente de fonte subterrânea para a população projetada em 2035.

Resultados e discussão

As cidades localizadas no baixo curso do rio Piracicaba (Antônio Dias, Coronel Fabriciano, Ipatinga, Santana do Paraíso e Timóteo), são atendidas pela empresa concessionária estatal COPASA; em Jaguaraçu e

Nova Era, o abastecimento é realizado pelo Serviço Municipal de Água e Esgoto (SEMAE) das prefeituras municipais. Na Tabela 3, é apresentado os tipos de captação do recurso hídrico para abastecimento da população da área urbana, em cada cidade, destacando ainda que, além dessas prospecções, o uso da água subterrânea por meio de poços e cisternas é utilizado nas áreas rurais de todos os municípios, em decorrência da carência de mananciais superficiais.

Tabela 3: Tipo de captação do recurso hídrico por município, Autores (2021)

Município	Tipo de Abastecimento
Antônio Dias	Abastecimento por água subterrânea (Poço Tubular)
Coronel Fabriciano	Abastecimento por água subterrânea (Poço Tubular)
Ipatinga	Abastecimento por água subterrânea (Poço Tubular)
Jaguaraçu	Abastecimento por água superficial (Captação em rio)
Nova Era	Abastecimento Misto (Captação em rio e Poço Tubular)
Santana do Paraíso	Abastecimento por água subterrânea (Poço Tubular)
Timóteo	Abastecimento por água subterrânea (Poço Tubular)

A finalidade do uso da água no baixo curso do rio Piracicaba, é predominantemente industrial, sendo esta atividade responsável por 51% do total captado. O segundo maior uso consuntivo é o abastecimento humano, correspondendo a 44% da demanda total. Os volumes captados para a irrigação e dessedentação animal, são pouco expressivos na bacia, com 5% da demanda (IGAM, 2020).

Quantificação de poços outorgados

A partir da confecção do cadastro de poços, obtido no IGAM (2020), verificou-se que o número de poços perfurados e outorgados no órgão ambiental para os municípios do baixo curso do rio Piracicaba, é de 1275 poços. A Figura 7 apresenta a disposição dos poços de captação de água subterrânea por município.



Figura 7. 2Poços outorgados por município, modificado de IGAM (2021).

A maioria dos poços estão nos municípios de maior aglomeração urbana, concentrados na região do Vale do Aço (Ipatinga,

Santana do Paraíso, Coronel Fabriciano, Timóteo), Tabela 4.

Tabela 4: Quantitativos de poços outorgador por cidade em relação a área estudada IGAM (2020).

Municípios	Número de Poços	Porcentagem	Vazão Outorgada (m ³ /h)
Antônio Dias	91	7,1%	51.071,10
Coronel Fabriciano	209	16,4%	277.352,54
Ipatinga	415	32,5%	1.453,49
Jaguaraçu	41	3,2%	62,7
Nova Era	122	9,6%	429,52
Santana do Paraíso	159	12,5%	316,13
Timóteo	238	18,7%	378.810,02

No Vale do Aço os poços outorgados para captação de água subterrânea respondem por

80,1% de todos os poços perfurados na região, onde Ipatinga responde sozinha por 32,5% deste

total. Da vazão captada na região, em Coronel Fabriciano e Timóteo tem-se a prospecção de maiores volumes conforme apresentado na Tabela 8, sendo 277.352,54 m³/h e 378.810,02 m³/h respectivamente.

A região do Vale do Aço, é totalmente dependente de fontes de água subterrânea visto que é uma região densamente urbanizada e que o Rio Piracicaba, que banha toda a região, não apresenta qualidade favorável para consumo humano e usos mais exigentes.

O município de Antônio Dias tem cerca de 90% de área rural, cujo abastecimento de água é por captação em nascentes e poços. Responde por 7,1% das captações totais, sendo o abastecimento da sede municipal de responsabilidade da concessionária estatal (COPASA), com vazão prospectada de 51.071,10 m³/h, em poços tubulares.

O município de Jaguaraçu, tem sua sede municipal abastecida por captação superficial, entretanto a zona rural é abastecida

principalmente por fontes subterrâneas, sendo captados 62,7 m³/h correspondendo a 3,2% dos poços perfurados do total.

Em Nova Era estão 9,6% dos poços perfurados do total e 429,52 m³/h da vazão outorgada para as águas subterrâneas. Neste município, o abastecimento da população se dá por meio de fontes superficiais e poços. É importante destacar que, estes dados são apenas as outorgas vigentes, existindo ainda captações que não possuem registro legal perante o órgão ou que estão com invalidas aguardando renovação.

Caracterização dos sistemas aquíferos

Ao analisar a área de estudo identifica-se a ocorrência de aquíferos porosos e fissurais, conforme mostra a Figura 8. Os aquíferos fissurais se fazem presente na maior parte da área de estudo, estando relacionados a domínio cristalino, domínio metassedimentos/metavulcânicas e entre os próprios aquíferos porosos.



Figura 8. Hidrogeologia do baixo curso do Rio Piracicaba, modificado de IGAM (2021).

A Tabela 5 apresenta a proposição e sistematização dos sistemas aquíferos e sua

relação com as unidades litoestratigráficas identificadas.

Tabela 5: Sistemas Aquíferos / Unidades Litoestratigráficas, Autores (2021).

Sistemas Aquíferos	Unidades Litoestratigráficas	Unidades Hidrogeológicas
Sistema Aquífero Gnáissico-Granítico	Suíte Borrachudos, Complexo Mantiqueira (Granitoides, gnaisses, migmatitos e granulitos).	Aquífero Granitóide
Sistema Aquífero Sedimentos Inconsolidados	Formações Cenozóicas	Aquífero Poroso
Aquífero Fissural	Grupo Nova Lima, Formação São Tomé, Grupo Maquiné, Grupo Itabira (Xistos, filitos, metarenitos, anfibolitos, quartzitos).	
Aquífero Misto	Litologias arenosas com pelitos e carbonatos	

A Figura 9 apresenta a disposição espacial dos poços perfurados e outorgados na

área de estudo correlacionando-os com seus respectivos aquíferos de prospecção.

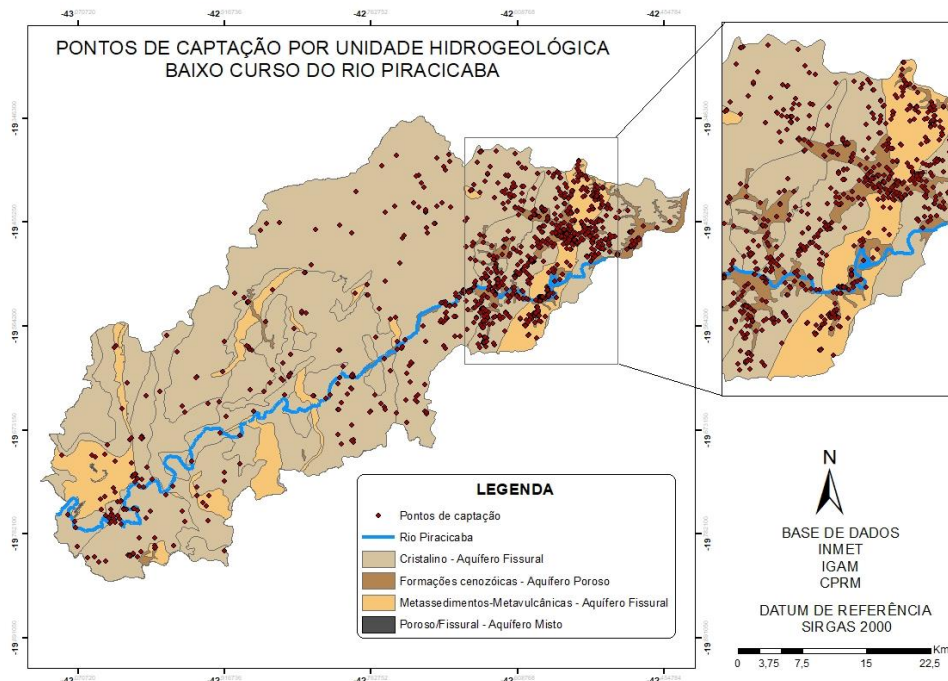


Figura 9. Poços outorgados por unidade hidrogeológica, modificado de IGAM (2021).

Sistema Aquífero Fissural de Domínio Cristalino

O aquífero fissural de domínio cristalino predominante na área, ocorre nos granitoides, gnaisses, migmatitos e granulitos. Neste sistema, de porosidade secundária, a ocorrência das águas subterrâneas está condicionada por fraturas e

fendas, que se traduz por reservatórios aleatórios, descontínuos e de pequena extensão. A produção dos poços perfurados e profundidade nesta região é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6: Produção de poços por tipo de domínio hidrogeológico, modificado do IGAM (2020).

Sistema Aquífero	Domínio	Número de Poços	Profundidade (m)	Q (m ³ /h)
Aquífero Fissural	Cristalino	619	1,8 ≤ P ≤ 180,0 Média: 27,53	0,0003 ≤ Q ≤ 800,0 Média: 4,03

Com valores variados, estando relacionada às fraturas, que são atingidas, a vazão obtida varia entre 0,0003 m³/h e 800,0 m³/h, e profundidade de perfuração entre 1,8 m a 180,0 m. A frequência das vazões específicas com o

número de poços correspondentes para cada domínio hidrogeológico, mostra que 51,3 % dos poços possuem vazão entre 0,11 m³/h a 1,0 m³/h, conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 1: Frequência de produção dos poços, modificado do IGAM (2020).

Q (m ³ /h)	Frequência (%)
≥ 0,1	6,6
0,11 a 1,0	51,3
1,1 a 10,0	37,0
≤ 10,1	3,3

E a frequência das profundidades com o número de poços correspondentes mostra que 43,9

% dos poços possuem profundidade entre 10,1 m e 20,0 m conforme mostra a Tabela 8.

Tabela 8: Frequência de profundidade dos poços, modificado do IGAM (2020).

Profundidade (m)	Frequência (%)
≥ 10,0	32,4
10,1 a 20,0	43,9
20,1 a 99,9	17,1
≤ 100,0	6,5

Sistema Aquífero Fissural de Domínio Metassedimentos/Metavulcânicas

Os aquíferos fissurais de domínio metassedimentos/metavulcânicas reúnem litotipos como xistos, filitos, metarenitos, anfíbolitos, quartzitos e outros. Neste também quase não existe porosidade, e a ocorrência da água subterrânea se dá por meio de fraturas e fendas, apresentando reservatórios aleatórios, descontínuos e de pequena extensão, assim como o aquífero fissural de domínio cristalino, o que

diferenciam os dois é o fato dos litotipos presentes serem diferentes, que irá ocasionar uma estruturação e competência distinta, assim como irão reagir diferentemente aos esforços causadores das fendas e fraturas, e apresenta uma maior favorabilidade hidrogeológica (Maharjan e Donovan, 2016; Cai e Ofterdinger, 2016). A produção dos poços perfurados e profundidade nesta região é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9: Produção de poços por tipo de domínio hidrogeológico, modificado do IGAM (2020).

Sistema Aquífero	Domínio	Número de Poços	Profundidade (m)	Q (m ³ /h)
Aquífero Fissural	Metassedimentos/ Metavulcânicas	208	1,5 ≤ P ≤ 180,0 Média: 29,35	0,001 ≤ Q ≤ 180,0 Média: 6,17

A frequência das vazões específicas com o número de poços correspondentes para cada domínio hidrogeológico, mostra que 48,8 % dos

poços possuem vazão entre 0,11 m³/h a 1,0 m³/h, conforme mostra a Tabela 10.

Tabela 2: Frequência de produção por poços, modificado do IGAM (2020).

Q (m ³ /h)	Frequência (%)
≥ 0,1	7,8
0,11 a 1,0	48,8
1,1 a 10,0	37,6
≤ 10,1	5,9

E a frequência das profundidades com o número de poços correspondentes mostra que 53,6

% dos poços possuem profundidade entre 10,1 m e 20,0 m conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 3: Frequência de profundidade por poços, IGAM (2020).

Profundidade (m)	Frequência (%)
≥ 10,0	22,4
10,1 a 20,0	53,6
20,1 a 99,9	16,8
≤ 100,0	7,2

Sistema Aquífero Poroso de Formações Cenozoicas

Os aquíferos porosos de formações cenozoicas são formados por rochas sedimentares de naturezas e espessuras variadas. Possui uma porosidade primária e nas áreas arenosas uma elevada permeabilidade. De acordo com a espessura das camadas de areia/argila, os poços podem produzir vazões significativas. Este

domínio está relacionado a depósitos como aluviões, coluviões, areia litorâneas e demais formações de coberturas residuais (BOMFIM, 2002). A produção dos poços perfurados e profundidade nesta região é apresentada na Tabela 12.

Tabela 4: Produção de poços por tipo de domínio hidrogeológico, modificado do IGAM (2020).

Sistema Aquífero	Domínio	Número de poços	Profundidade (m)	Q (m ³ /h)
Aquífero Poroso	Formações Cenozóicas	448	2,0 ≤ P ≤ 210,0 Média: 28,78	0,011 ≤ Q ≤ 306 Média: 6,02

A frequência das vazões específicas com o número de poços correspondentes para cada domínio hidrogeológico, mostra que 51,3 % dos

poços possuem vazão entre 0,11 m³/h a 1,0 m³/h, conforme mostra a Tabela 13.

Tabela 5: Frequência de produção por poços, modificado do IGAM (2020).

Q (m ³ /h)	Frequência (%)
≥ 0,1	6,4
0,11 a 1,0	51,3
1,1 a 10,0	38,3
≤ 10,1	4,0

E a frequência das profundidades com o número de poços correspondentes mostra que 48,5

% dos poços possuem profundidade entre 10,1 m e 20,0 m conforme mostra a Tabela 14.

Tabela 6: Frequência de profundidade por poços, modificado do IGAM (2020).

Profundidade (m)	Frequência (%)
≥ 10,0	28,6
10,1 a 20,0	48,5
20,1 a 99,9	15,4
≤ 100,0	7,5

Sistema Aquífero Misto

Em menor parcela na área de estudo, temos os aquíferos mistos poroso/fissural, onde ocorrem litologias arenosas com pelitos e carbonatos. São caracterizados por litificação acentuada, forte compactação e faturamento acentuado, apresentando então comportamento de aquífero granular com porosidade primária baixa/média, e um comportamento fissural acentuado com porosidade secundária de fendas e fraturas, o que lhe confere caracterização de aquífero misto, com baixa favorabilidade hidrogeológica (Setlur et al., 2019; Vassolo et al., 2019). Não foram encontrados poços perfurados e outorgados neste sistema aquífero.

A caracterização dos sistemas aquíferos

O baixo curso do rio Piracicaba apresenta poços perfurados outorgados de produtividade entre 0,0003 m³/h, a 800,00 m³/h. A maioria destes poços (609), estão perfurados sobre o sistema aquífero fissural, nos granitóides, gnaisses e migmatitos da Suíte Borrachudo, do Granito Bicas e Complexo Mantiqueira. Outros 448 poços, se encontram sobre o Sistema Aquífero Poroso cujo domínio são as Formações Cenozoicas Aluvionares, constituídas por litologias de rochas sedimentares como areais e formações de cobertura detríticas. O restante do cadastro, 208 poços, estão sobre o Sistema Aquífero Fissural de domínio metassedimentar/metavulcânico, com formações do Grupo Nova Lima, Super Grupo Rio das Velhas, Formação São Tomé, Grupo Maquiné e Grupo Itabira; cujas litologias presentes são

xistos, filitos, metarenitos, anfíbolitos e quartizitos.

Quanto a produtividade dos poços avaliados, verifica-se que nas unidades de metassedimentos-metavulcânicos uma maior favorabilidade hidrogeológica em relação ao cristalino, entretanto na região, pelos dados apresentados se destaca os poços perfurados em aquíferos fissurais cristalinos, este fato é embasado na provável contribuição do aquífero granular localizado nos aluviões do Rio Piracicaba, e ainda pelos reservatórios desse tipo de aquífero ocorrer em meio as fraturas e fendas, em reservatórios aleatórios, o que faz que, ao perfurar um poço e este atingir um reservatório maior, sua vazão será mais elevada; desse modo, os poços perfurados em aquíferos fissurais de domínio cristalino chegaram a apresentar vazão de 800,0 m³/h.

Já nos aquíferos porosos, a maior vazão registrada foi de 306,0 m³/h. E os aquíferos fissurais de domínio metassedimentar/metavulcânico, são a menor quantidade na área de estudo, e apesar da maior favorabilidade hidrogeológica apresentada quanto aos de domínio cristalino, tem o menor valor de vazão da área de estudo, 180,0 m³/h. Entretanto, quando calculada a média das vazões de todos os poços perfurados, este domínio apresenta o maior valor, 6,17 m³/h, o que pode ser explicado pelo fato de o número de poços ser menor e os reservatórios dispostos aleatoriamente nas formações geológicas, não terem sido perfurados poços em áreas de maior produtividade do domínio em questão.

Quanto a profundidade dos poços, os perfurados em aquíferos porosos apresentaram

maiores valores, 210 metros; enquanto os aquíferos fissurais, tanto de domínio cristalino quanto metassedimentar/metavulcânico, o maior valor registrado foi de 180 metros. Com base na geometria do aquífero da região do Vale do Aço, onde está localizada a maior quantidade de poços perfurados da região estudada, realizada por Oliveira (2018), tem-se abaixo da elevação do terreno uma camada de material argiloso de cerca de 7 metros de espessura, seguida por uma camada de 28 metros de material arenoso; os dados apresentados anteriormente mostram que a maior frequência de poços se encontram nesta faixa de profundidade, o que explica a maior produtividade dos poços no trecho de 10,1 metros a 20,0 metros de profundidade; quando o aquífero se faz por material inconsolidado, não tendo presença de rochas, apenas material de alta permeabilidade tornando-se assim um bom reservatório de água.

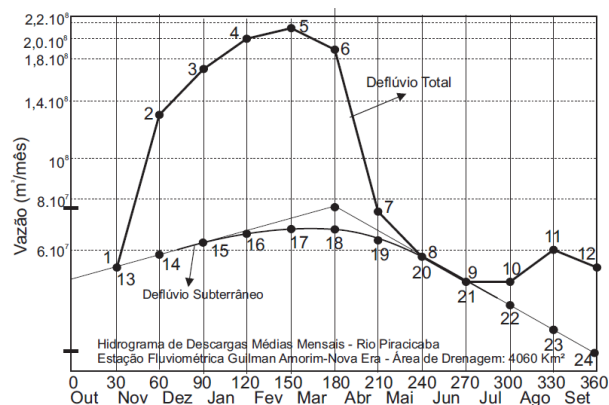
Potencial e disponibilidades hídricas

A avaliação do potencial hídrico subterrâneo se deu com base no período de recessão hidrológica, quando o deflúvio é constituído basicamente do escoamento

subterrâneo, responsável pela alimentação dos cursos d'água durante o período de estiagem (Worthington et al., 2016).

Os hidrogramas construídos permitiram estimar os volumes escoados através das componentes superficiais e subterrâneas (Carvalho et al., 2014). As Figuras 21 e 22 mostram o deflúvio total e o deflúvio subterrâneo das estações fluviométricas de Guilman Amorim e Mário de Carvalho. As análises dos hidrogramas permitiram verificar a correlação entre os regimes pluviométrico e fluviométrico, bem como a relação do deflúvio total e o deflúvio subterrâneo através da interação entre as águas subterrâneas e superficiais (Santos e Koide, 2016).

O esgotamento corresponde ao período que ocorre a diminuição da água armazenada nos sistemas aquíferos da bacia, indicando o período de déficit pluviométrico (Khaledian et al., 2016; Pinheiro et al., 2019). Os hidrogramas mostram que o período estiagem acontece entre os meses de abril (início do período de esgotamento) a setembro (fim do período de esgotamento), e o período úmido vai do mês de outubro a março, que concorda com o período de alta pluviometria na região, registrando as maiores vazões do rio.



Deflúvio Total (m³)	Deflúvio Subterrâneo (m³)
1 - 5,35 . 10 ⁷	13 - 5,35 . 10 ⁷
2 - 1,30 . 10 ⁸	14 - 5,95 . 10 ⁷
3 - 1,69 . 10 ⁸	15 - 6,15 . 10 ⁷
4 - 2,01 . 10 ⁸	16 - 6,88 . 10 ⁷
5 - 2,13 . 10 ⁸	17 - 7,17 . 10 ⁷
6 - 1,89 . 10 ⁸	18 - 7,18 . 10 ⁷
7 - 7,50 . 10 ⁷	19 - 6,15 . 10 ⁷
8 - 5,76 . 10 ⁷	20 - 5,76 . 10 ⁷
9 - 5,01 . 10 ⁷	21 - 5,01 . 10 ⁷
10 - 5,02 . 10 ⁷	22 - 4,06 . 10 ⁷
11 - 6,01 . 10 ⁷	23 - 3,62 . 10 ⁷
12 - 5,46 . 10 ⁷	24 - 2,80 . 10 ⁷

Figura10. Hidrograma de descargas médias mensais - Estação Fluviométrica Guilman-Amorim

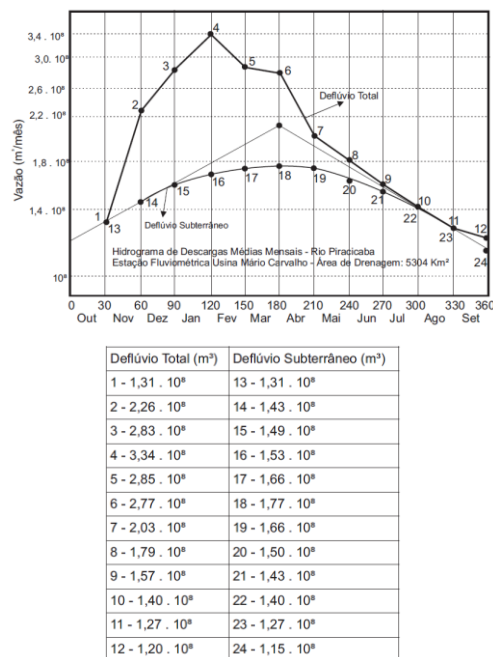


Figura 11. Hidrograma de descargas médias mensais - Estação Fluviométrica Mário Carvalho

O potencial e as disponibilidades hídricas

No período úmido, a rede de drenagem é responsável pela recarga dos aquíferos. No período de estiagem, a perenidade dos rios é mantida pela contribuição dos aquíferos (Le et al., 2018; Blom et al., 2017).

Os resultados dos estudos dos hidrogramas permitiram avaliar os dados referentes aos deflúvios total e subterrâneo; onde no período de abril a setembro os valores do deflúvio subterrâneo chegam a se igualar ao deflúvio total, mostrando que a vazão do rio no período é totalmente dependente do fluxo de água subterrânea. Isto ocorre para a estação Guilman Amorim nos meses de maio e junho, $5,76 \times 10^7$ e $5,01 \times 10^7$ respectivamente; e para Mário Carvalho nos meses de julho e agosto, $1,40 \times 10^8$ e $1,27 \times 10^8$ respectivamente.

Além disso, o percentual do deflúvio subterrâneo com relação ao deflúvio total, dentro da área de estudo, apresenta valores superiores a 34% para a estação Guilman Amorim, sendo este o menor valor referente ao mês de fevereiro, que corresponde ao maior pico de cheia do período. Quanto a estação de Mário Carvalho, temos valores superiores a 46% de contribuição, este

correspondendo ao mês de janeiro, que apresenta o pico de cheia.

A capacidade de restituição subterrânea dos aquíferos é estabelecida pelo deflúvio subterrâneo, caracterizando a potencialidade dos aquíferos que correm na bacia (Bernard-Jannin et al., 2016; Obodovskyi et al., 2020). Dentro desse propósito, observamos que na área drenada para o rio Piracicaba, as contribuições crescem de montante para jusante. A região de maior contribuição com base na estação fluviométrica Mário Carvalho, encontra-se em suas proximidades sobre aquíferos porosos e aquíferos fissurais de domínio metassedimentar/metavulcânico, onde esses apresentam maior favorabilidade hidrogeológica, permitindo a maior capacidade de infiltração e armazenamento na região.

Uso das águas subterrâneas e estimativas de demandas futuras

Considerando o uso das águas subterrâneas captadas por município, com base nos poços outorgados cadastrados, a distribuição por tipo de uso é mostrada na Tabela 15.

Tabela 15: Distribuição percentual de poços quanto ao tipo de uso, modificado do IGAM (2021).

Municípios	Tipo de Uso	%
Antônio Dias	Consumo Humano	66,0
	Serviços Diversos	34,0
Coronel Fabriciano	Consumo Humano	41,4
	Serviços Diversos	58,6
Ipatinga	Consumo Humano	52,4
	Serviços Diversos	47,6
Jaguaraçu	Consumo Humano	78,0
	Serviços Diversos	22,0
Nova Era	Consumo Humano	57,0
	Serviços Diversos	43,0
Santana do Paraíso	Consumo Humano	55,0
	Serviços Diversos	45,0
Timóteo	Consumo Humano	47,9
	Serviços Diversos	52,1

Para os municípios que utilizam apenas água subterrânea para abastecimento urbano, é possível estimar as demandas futuras de água a serem extraídas dos aquíferos. Foi utilizado a estimativa populacional com base no Atlas Esgoto

(ANA) e os valores de referência segundo Von Sperling (1996). A Tabela 16, mostra a demanda hídrica subterrânea projetada, para abastecimento urbano por meio de poços, a partir da projeção populacional urbana para 2035.

Tabela 16: Projeção da população urbana em 2035 x Demanda hídrica em 2035, ANA (2021).

Municípios	População Urbana em 2020	População Urbana em 2035	Demanda Hídrica Prevista (l/dia)
Antônio Dias	4.757	5.474	$8,76 \times 10^5$
Coronel Fabriciano	106.945	113.646	$2,5 \times 10^7$
Ipatinga	250.456	278.802	$8,36 \times 10^7$
Santana do Paraíso	28.020	37.749	$6,79 \times 10^6$
Timóteo	85.888	95.863	$2,11 \times 10^7$

Discussão

Os municípios de Santana do Paraíso, Timóteo, Coronel Fabriciano e Ipatinga, são abastecidas exclusivamente por poços tubulares de propriedade da empresa estatal COPASA. Os quantitativos do uso da água captada nestes municípios, ficaram equilibrados entre consumo humano e o dos serviços diversos.

Os poços locados na estação de captação e tratamento da COPASA do Amaro Lanari, em Coronel Fabriciano, opera atualmente com 26 poços tubulares perfurados no aquífero aluvionar, sendo responsável pelo principal sistema de

abastecimento de água da região do Vale do Aço; o aquífero em questão é caracterizado pela maior capacidade de infiltração e armazenamento na região; o que favorece no abastecimento da região, e ao atendimento da demanda futura estimada, cujo valor $1,37 \times 10^8$ l/dia.

Quanto à disponibilidade hídrica subterrânea da região de estudo, junto a foz do rio Piracicaba tem-se a maior vazão específica; fato concordante a localização do aquífero granular nas cidades de Ipatinga, Timóteo e Coronel Fabriciano. Estima-se que as captações por meio de poços tubulares mais produtivas estão localizadas nas aluviões do rio Piracicaba. Os

municípios de Timóteo, Ipatinga, Coronel Fabriciano e Santana do Paraíso respondem pela maior parte dos poços outorgados da região, confirmando, portanto, o intenso uso do aquífero local.

Conclusão

Na região estudada a captação da água subterrânea se dá em aquíferos fissurais cristalinos, aquíferos porosos e aquíferos fissurais metassedimentares/metavulcânicos.

Quanto a favorabilidade hidrogeológica, destacam-se os poços perfurados em aquíferos porosos aluvionares, sendo que 80% desses poços apresentam profundidade menor que 20,0 metros, fato explicado pelo caráter aluvionar da região.

A manutenção da vazão do rio Piracicaba nos períodos de déficit pluviométrico, (abril a setembro), é dependente do deflúvio subterrâneo. Em determinados momentos os valores de deflúvio total e subterrâneo chegam a se igualar, meses de maio e junho para a estação Guilman Amorim, e meses de julho e agosto para a estação Mário Carvalho, conforme demonstrado nos hidrogramas.

O deflúvio subterrâneo representa cerca de 34% do deflúvio total, e mostra que os índices de contribuição são crescentes de montante a jusante. A região com maior percentual de contribuição, jusante, desenvolve-se sob região de aquíferos de maior favorabilidade hidrogeológica, que permite maior capacidade de infiltração e armazenamento de água.

O uso dos mananciais subterrâneos para consumo humano é maior nos municípios que possuem população rural majoritária (Antônio Dias, Jaguarauçu e Nova Era). Entretanto as cidades com uma população majoritariamente urbana, (Coronel Fabriciano, Ipatinga, Santana do Paraíso e Timóteo) são abastecidas em sua totalidade, por poços artesianos, seja para consumo humano ou para prestação de serviços.

A relação entre a projeção populacional para 2035 e a demanda hídrica para o abastecimento dos municípios que utilizam água subterrânea, mostra que o volume calculado e a capacidade de armazenamento dos aquíferos, configuram um cenário de disponibilidade hídrica favorável para o atendimento do cenário futuro.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA, Projeto CAPES/ANA AUXPE N°. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento

Referências

- Alagna, V., Bagarello, V., Di Prima, S., Iovino, M. 2016. Determining hydraulic properties of a loam soil by alternative infiltrometer techniques. *Hydrological Processes*, 30, 263-275.
- Almeida-Abreu, P.A., Renger, F.E. 2002. Serra do Espinhaço meridional: um orógeno decolado do mesoproterozóico. *Revista Brasileira de Geociências*, 32, 1-14.
- ANA. Agência Nacional de Águas. 2013. Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce: relatório executivo / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2013.
- ANA. Agência Nacional de Águas. 2018. Situação da água no mundo. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/textos-das-paginas-do-portal/agua-no-mundo/agua-no-mundo>. Acesso em: 3 mar. 2020.
- ANA. Agência Nacional de Águas. 2019. Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil. Brasília: Agência Nacional de Águas. 75 p. v. 1. ISBN 978-85-8210-057-8. Disponível em: www.ana.gov.br. Acesso em: 1 nov. 2019.
- Babaye, M.S.A., Urban, P., Ousmane, B., Favreau, G., Brouyère, S., Dassargues, A. 2019. Characterization of recharge mechanisms in a Precambrian basement aquifer in semi-arid south-west Niger. *Hydrogeology Journal*, 27, 475-491.
- Baiamonte, G., Bagarello, V., D'asaro, F., Palmeri, V. 2017. Factors influencing point measurement of near surface saturated soil hydraulic conductivity in a small Sicilian basin. *Land Degradation & Development*, 28, 970-982.
- Baiocchi, A., Lotti, F., Piscopo, V. 2016. Occurrence and flow of groundwater in crystalline rocks of Sardinia and Calabria (Italy): an overview of current knowledge. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 5, 7-13.

- Bernard-Jannin, L., Brito, D., Sun, X., Jauch, E., Neves, R., Sauvage, S., Pérez, J.M.S. 2016. Spatially distributed modelling of surface water-groundwater exchanges during overbank flood events – a case study at the Garonne River. *Advances in Water Resources*, 94, 146-159.
- Blom, A., Arkesteijn, L., Chavarrías, V., Viparelli, E. 2017. The equilibrium alluvial river under variable flow and its channel-forming discharge. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122, 1924-1948.
- Cai, Z., Offerdinger, U. 2016. Analysis of groundwater-level response to rainfall and estimation of annual recharge in fractured hard rock aquifers, NW Ireland. *Journal of Hydrology*, 535, 71-84.
- Carvalho, V.E.C., Rezende, K.S., Paes, B.S., Betim, L.S., Marques, E.A.G. 2014. Estimativa da Recarga em uma Sub-bacia Hidrográfica Rural Através do Método da Variação do Nível D'Água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19, 271-280.
- Chemale, F., Dussin, I.A., Martins, M., Santos, M. N. 2011. Nova abordagem tectonoestratigráfica do Supergrupo Espinhaço em sua porção meridional (MG). *Geonomos*, 19, 173-41.
- CPRM. 2000. Projeto Leste: Folha Ipatinga. Belo Horizonte, 67 p.
- Castany, G. 1967, 'Traité pratique des eaux souterraines', Paris, France.
- Dewandel, B., Lanini, S., Lachassagne, P., Maréchal, J. 2018. A generic analytical solution for modelling pumping tests in wells intersecting fractures. *Journal of Hydrology*, 559, 89-99.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2006. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2. ed. Rio de Janeiro.
- Gonçalves, J.A.C. 2005. Reservas Renováveis e Caracterização dos Aquíferos Fissurais do Leste da Zona da Mata de Minas Gerais e Adjacências. *Geologia USP Série Científica*, 5, 19-27.
- Gonçalves, J.A.C., Almeida, M.S.L., Ferreira, M.A.M., Paiva, B.L.F. 2019. Disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas na bacia do Rio do Peixe-Itabira-MG. *Research, Society, Development*, 8, 1-17.
- Hao, A., Zhang, Y., Zhang, E. 2018. Review: Groundwater resources and related environmental issues in China. *Hydrogeology Journal*, 26, 1325-1337.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010. Censo Demográfico 2010. Castro., K., Q., Gonçalves., J., A., C. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html> Acesso em: 1 nov. 2019.
- IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. 2014. 2º Relatório de Gestão e Situação dos Recursos Hídricos em Minas Gerais. Belo Horizonte, 259 p.
- IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. 2021. Legislação Aplicável. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/component/content/article/16-duvidas/2161-legislacao-aplicavel>.
- IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. 2017. Relatório Anual: Gestão e Situação dos Recursos Hídricos de Minas Gerais. Edição. Belo Horizonte, pp. 58-59.
- Jordt-Evangelista, H., Lana, C., Delgado, C.E.R., Viana, D.J. 2016. Age of the emerald mineralization from the Itabira-Nova Era District, Minas Gerais, Brazil, based on LA-ICP-MS geochronology of cogenetic titanite. *Brazilian Journal Geology*, 46, 427-437.
- Khaledian, M.R., Shabanpour, M., Alinia, H. 2016. Saturated hydraulic conductivity variation in a small garden under drip irrigation. *Geosystem Engineering*, 19, 266-274.
- Killian, C.D., Asquith, W.H., Barlow, J.R.B. 2019. Characterizing groundwater and surface-water interaction using hydrograph-separation techniques and groundwater-level data throughout the Mississippi Delta, USA. *Hydrogeology Journal*, 27, 2167-2179.
- Knauer, L.G. 2007. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. *Geonomos* 15, 81-90.
- Lana, C., Alkmim, F., Armstrong, R., Scholz, R., Romano, R., Nalini, H. 2013. The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. *Precambrian Research*, 231, 157-173.
- Le, T.B., Crosato, A., Uijttewaal, W.S.J. 2018. Long-term morphological developments of river channels separated by a longitudinal training wall. *Advances in Water Resources*, 113, 73-85.
- Maharjan, M., Donovan, J.J. 2016. Groundwater response to serial stream stage fluctuations in shallow unconfined alluvial aquifers along a regulated stream. *Hydrogeology Journal*, 24, 2003-2015.
- Neto, A.F.S., Bertachini, A.C., Girodo, A.C., Almeida, D.C. 2001. Hydrogeological Model of the Itabira iron ore district. *International*

- Mine Water Association Symposium, Belo Horizonte.
- Obodovskyi, O., Habel, M., Szatten, D., Rozlach, Z., Babiński, Z., Maerker, M. 2020. Assessment of the Dnieper Alluvial Riverbed Stability Affected by Intervention Discharge Downstream of Kaniv Dam. *Water*, 12, 1-17.
- Ohmer, M., Liesch, T., Goeppert, N., Goldscheider, N. 2017. On the optimal selection of interpolation methods for groundwater contouring: An example of propagation of uncertainty regarding inter-aquifer Exchange. *Advances in Water Resources*, 109, 121-132.
- Pinheiro, E.A.R., Lier, Q., Simunek, J. 2019. The role of soil hydraulic properties in crop water use efficiency: A process-based analysis for some Brazilian scenarios. *Agricultural Systems*, 173, 364-377.
- Reboita, M.S., Rodrigues, M., Silva, L.F., Alves, M.A. 2015. Aspectos Climáticos do Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, 17, 206-226
- Salgado, A.A.R., Varajão, C.A.C., Colin, F., Braucher, R., Nalini Junior, H.A., Varajão, A.F.D. 2004. O papel da denudação geoquímica no processo de erosão diferencial no Quadrilátero Ferrífero/MG. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 5, 55-69
- Santos, R.M., Koide, S. 2016. Avaliação da Recarga de Águas Subterrâneas em Ambiente de Cerrado com Base em Modelagem Numérica do Fluxo em Meio Poroso Saturado. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21, 451-465.
- Setlur, N., Sharp, J.M., Hunt, B.B. 2019. Crystalline-rock aquifer system of the Llano Uplift, central Texas, USA. *Hydrogeology Journal*, 27, 2431-2446.
- SNIRH. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Séries Históricas de Estações. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>
- Vassolo, S., Neukum, C., Tiberghien, C., Heckmann, M., Désiré, K, Baranyikwa, D. 2019. Hydrogeology of a weathered fractured aquifer system near Gitega, Burundi. *Hydrogeology Journal*, 27:625-641.
- Von Sperling, M. 1996. Introdução à qualidade de águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte.
- Worthington, S.R.H., Davies, G.J., Alexander, E.C. 2016. Enhancement of bedrock permeability by weathering. *Earth-Science Reviews*, 160, 88-202.