

**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS
CAMPUS SÃO JOÃO EVANGELISTA
PÓS GRADUAÇÃO *LATO SENSU* EM MEIO AMBIENTE**

**EFEITOS DE UMA CAVA DE MINERAÇÃO NO REGIME HIDROLÓGICO E
HIDROGEOLÓGICO EM UMA MICROBACIA DO RIBEIRÃO GRAIPU**

**SÃO JOÃO EVANGELISTA
2020**

GUILHERME MARQUES DE PINHO TAVARES

**EFEITOS DE UMA CAVA DE MINERAÇÃO NO REGIME HIDROLÓGICO E
HIDROGEOLÓGICO EM UMA MICROBACIA DO RIBEIRÃO GRAIPU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Meio Ambiente, no Instituto Federal de Minas Gerais campus São João Evangelista (IFMG/SJE).

Orientador: Prof. Dr. Mateus Marques Bueno

SÃO JOÃO EVANGELISTA

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

T231e Tavares, Guilherme Marques de Pinho.

Efeitos de uma cava de mineração no regime hidrológico e hidrogeológico em uma microbacia do Ribeirão GRAIPU. / Guilherme Marques de Pinho Tavares. - São João Evangelista: IFMG, 2021.

67fl.;il.

Orientador: Dr. Mateus Marques Bueno.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Meio Ambiente) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista, 2020.

1. Balanço hídrico. 2. Condutividade hidráulica. 3. Modelo analítico. 4. Aquífero. I. Tavares, Guilherme Marques de Pinho. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista. III. Título.

CDD 628

Catálogo: Rejane Valéria Santos – CRB-6/2907

GUILHERME MARQUES DE PINHO TAVARES

**EFEITOS DE UMA CAVA DE MINERAÇÃO NO REGIME HIDROLÓGICO E
HIDROGEOLÓGICO EM UMA MICROBACIA DO RIBEIRÃO GRAIPU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Meio Ambiente, no Instituto Federal de Minas Gerais campus São João Evangelista (IFMG/SJE).

Aprovado em: 21/12/2020 pela banca examinadora:



Prof. Dr. Mateus Marques Bueno – IFMG (Orientador)



Prof.^a Dra. Grazielle Wolff de Almeida Carvalho – IFMG



Prof.^a Dra. Helena Saraiva Koenow Pinheiro – UFRRJ

Dedico esse trabalho aos meus pais, Ramiro e Imaculada, por serem meus exemplos de força e determinação, e por abdicarem dos seus sonhos para permitir que eu realizasse os meus.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por seu o guia da minha vida, por me iluminar sempre, conceder a força, a sabedoria e o discernimento necessário para chegar até aqui.

Aos meus pais, Ramiro e Imaculada, por toda manifestação de apoio, carinho e amor que nos incentivava cada vez mais, e por serem meu alicerce, onde sempre pude apoiar para crescer e evoluir.

Ao meu irmão, Filipe, pelo companheirismo e calma, mesmo nos momentos de estresse.

À Marcela, minha eterna companheira, por todo carinho, amor, compreensão, incentivo e apoio nos momentos de desânimo.

Aos meus amigos, Jean (Tão) pelo companheirismo e parceria durante os trabalhos de campo, e André (Tilaska) pela ajuda e empréstimo do equipamento para levantamento aéreo com drone na área de estudo, a contribuição de vocês foi fundamental para o desse trabalho.

Ao Felipe Costa, do fundo do meu coração, um colega de profissão que clareou e enriqueceu todo o caminho desse trabalho, e que compartilhou o conhecimento técnico de maneira extremamente didática, sem você não teria nem começado, muito obrigado.

Ao professor Mateus, pelo conhecimento compartilhado, por sempre acreditar em mim e me incentivar, mesmo quando nem eu achava que era possível, por abdicar dos seus afazeres e dedicar um pouco do seu tempo e conhecimento para me guiar nesse trabalho, sua orientação foi fundamental, feliz aquele que tem a oportunidade de aprender com você.

Ao SAAE Guanhães, em especial à Viviane e Elise, por contribuir no direcionamento do trabalho, e por aguçar em mim o desejo de descobrir a magnitude do impacto causado pela mineração em nossa região.

Por fim, agradeço ao IFMG – *Campus* São João Evangelista por ter me dado a oportunidade de me desenvolver como pessoa e profissional, e a todas as pessoas que contribuíram ainda que indiretamente para que isso acontecesse.

RESUMO

A mineração está na base da cadeia produtiva. À medida que a profundidade da lavra das minas avança é comum que o nível de extração atinja o nível piezométrico dos aquíferos, sendo necessário o rebaixamento do nível d'água. A interferência nos aquíferos, se não for bem conduzida, pode causar impactos na região do seu entorno e afetar outros usuários dos recursos hídricos, desencadeando problemas complexos de gestão. A fim de avaliar a interferência de uma cava de mineração localizada em uma microbacia do Ribeirão Graipu, esse trabalho teve como objetivo interpretar, de forma analítica, através de parâmetros reais, o impacto da cava na dinâmica hídrica da microbacia, determinando variáveis hidrológicas e hidrogeológicas locais que foram usadas na elaboração de um modelo analítico para estimar a entrada e saída de água, classificando qualitativamente o impacto causado. Os trabalhos de campo foram realizados no período de outubro de 2019 a maio de 2020. Os dados climatológicos da área foram obtidos através da compilação de dados de séries históricas, compreendidas entre 1968 e 2018. O cálculo do escoamento superficial levou em conta a intensidade das chuvas, a área de drenagem e o coeficiente de escoamento superficial. A recarga foi estimada com base na vazão de uma nascente localizada dentro da área da cava, considerando um aquífero em regime estacionário. A condutividade hidráulica foi obtida através da interpretação de ensaios *slugtest* e *bailtest*. O modelo analítico foi elaborado no Excel, e utilizou equações matemáticas para previsibilidade de situações reais na área de estudo. Os resultados apontaram precipitação anual de 1319,40 mm, coeficiente de 0,26 para o escoamento superficial, taxa de recarga de 1,71%, e condutividade hidráulica de $3,9 \times 10^{-8}$ m/s. A vazão máxima de entrada de água subterrânea na cava é de 0,43 m³/h. O balanço hídrico aponta que 83,6% da água que acumula na cava é proveniente do escoamento superficial, seguido por 13,5% da precipitação, e por último 2,9% do influxo de água subterrânea. Diante disso, considerando que a cava está paralisada, o impacto sobre os recursos hídricos foi classificado como positivo, sendo esse o único fator analisado nesse trabalho, portanto podem existir outros impactos negativos.

Palavras chave: Balanço hídrico. Condutividade hidráulica. Modelo analítico. Aquífero. Impacto.

ABSTRACT

Mining is at the base of the production chain. As the mining depth of the mine progresses, it is common for the level of extraction to reach the piezometric level of the aquifers, requiring the lowering of the water level. Interference in aquifers, if not well conducted, can cause impacts in the surrounding region and affect other users of water resources, triggering complex management problems. In order to assess the interference of a mining pit located in a watershed in Ribeirão Graipu, this work aimed to interpret, analytically, through real parameters, the impact of the pit on the water dynamics of the watershed, determining hydrological and hydrogeological variables locations that were used in the elaboration of an analytical model to estimate the inflow and outflow of water, qualitatively classifying the impact caused. The fieldwork was carried out from October 2019 to May 2020. The climatological data of the area were obtained through the compilation of data from historical series, between 1968 and 2018. The calculation of the runoff took into account the intensity of the rainfall, drainage area and runoff coefficient. The recharge was estimated based on the flow of a spring located inside the pit area, considering a stationary aquifer. The hydraulic conductivity was obtained through the interpretation of slugtest and bailtest tests. The analytical model was developed in Excel, and used mathematical equations to predict real situations in the study area. The results showed an annual precipitation of 1319.40 mm, a coefficient of 0.26 for surface runoff, a recharge rate of 1.71%, and hydraulic conductivity of 3.9×10^{-8} m/s. The maximum flow of groundwater into the pit is 0.43 m³/h. The hydric balance indicates that 83.6% of the water that accumulates in the pit comes from runoff, followed by 13.5% of precipitation, and finally 2.9% of the inflow of groundwater. Therefore, considering that the pit is paralyzed, the impact on hydric resources was classified as positive, this being the only factor analyzed in this work, so there may be other negative impacts.

Keywords: Hydric balance. Hydraulic conductivity. Analytical model. Aquifer. Impact.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Possíveis fontes e locais de consumo da água nas fases comuns de produção.	16
Figura 2 - Dinâmica hidrogeológica de aquíferos livres (não confinados) e aquíferos confinados.....	20
Figura 3 - Ilustração da execução dos ensaios <i>Slug Test</i> e <i>Bail Test</i>	23
Figura 4 - Localização da área de estudo e sua inserção na bacia hidrográfica do Rio Doce, no Estado de Minas Gerais. Destaque para as UPGRH DO3 e DO4 determinadas pelo IGAM.	27
Figura 5 – Mapa dos solos da região de estudo de acordo com a classificação de Fernandes Filho <i>et al.</i> (2010)	30
Figura 6 - Mapa geológico da região de estudo de acordo com a caracterização de Grossi Sad (1997).....	31
Figura 7 - Ortofoto da região de estudo, com delimitação da microbacia onde houve o rebaixamento do lençol freático e indicação do Ribeirão Graipu.....	32
Figura 8 - Procedimento de medição de vazão da nascente.....	36
Figura 9 - Piezômetro instalado na microbacia de estudo e utilizado para realização dos ensaios de <i>slugtest</i> e <i>bailtest</i>	37
Figura 10 - Desenho esquemático do slugtest e os parâmetros geométricos do método de Hvorslev (1951).	38
Figura 11 - Modelo digital de elevação (MDE) da microbacia estudada, com destaque para a localização da cava, na porção norte da microbacia.....	43
Figura 12 – Representação do raio de influência teórico em um cenário de rebaixamento do nível d'água.	49
Gráfico 1 - Descrição da Cota x Área x Volume da cava fechada.....	44
Gráfico 2 - Médias mensais de precipitação evaporação de referência para o estudo. .	45
Gráfico 3 - Curva da razão de rebaixamento em função do tempo com marcação de T_0 – <i>SlugTest</i>	46
Gráfico 4 - Curva da razão de rebaixamento em função do tempo com marcação de T_0 – <i>Bailtest</i>	47

Gráfico 5 - Relação entre a vazão de entrada de água subterrânea na cava e a cota da lâmina d'água do lago.	50
Gráfico 6 - Evolução do enchimento da cava.	52
Gráfico 7 - Distribuição da origem da água acumulada na cava durante o período de enchimento.	53
Gráfico 8 - Comportamento das componentes do balanço hídrico ao longo de 5 anos.	54
Gráfico 9 - Comportamento da vazão de extravasão de água na cava em um período de 5 anos.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de cálculo e valores de condutividade hidráulica obtidos pelo método de Hvorslev.	47
Tabela 2 - Inputs para cálculo de entrada de água subterrânea.	48
Tabela 3 - Vazões mensais consideradas no balanço hídrico do enchimento da cava em cada mês.	51
Tabela 4 – Vazões mensais de entrada e extravasão de água.	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 A Atividade de Mineração - Impactos Positivos e Negativos	13
2.2 Contexto geológico regional de Serro	17
2.3 Hidrogeologia	18
2.3.1 <i>Aquíferos</i>	18
2.3.2 <i>Recarga de Aquíferos</i>	20
2.3.3 <i>Condutividade Hidráulica (K)</i>	22
2.4 Escoamento Superficial	24
2.5 Modelagem Hidrogeológica	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Caracterização da área de estudo	27
3.2 Delimitação da área de drenagem e detalhamento planialtimétrico da cava	32
3.3 Dados climatológicos	34
3.4 Escoamento Superficial	35
3.5 Estimativa de Recarga	36
3.6 Cálculo da condutividade hidráulica (K)	37
3.7 Cálculo do influxo de água subterrânea na cava	39
3.8 Balanço hídrico no enchimento da cava	41
3.9 Elaboração do modelo	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5 CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

A atividade mineradora, segundo Cordeiro *et al.* (2019), está na base da cadeia produtiva para atendimento às necessidades dos seres vivos, dessa forma à medida que o número populacional aumenta, cresce também a demanda pelos recursos minerais. Entretanto estes são recursos finitos e à medida que o volume de extração aumenta as condições de lavra se tornam mais difíceis e a disponibilidade de minério diminui, sendo necessário readequação dos processos e introdução de métodos de tratamento mineral, a fim de aumentar o teor do produto e reduzir o índice de elementos contaminantes. De acordo com Domingues *et al.* (2006) é bem frequente que o nível da extração no decorrer da lavra, seja ela à céu aberto ou subterrânea, atinja o nível piezométrico dos aquíferos livres ou confinados, sendo necessário o rebaixamento no nível d'água através de bombeamento enquanto durar a exploração da mina.

Apesar da prática comum de rebaixamento do nível d'água em minerações, essa atividade possui um potencial considerável na geração de impactos negativos sobre os recursos hídricos. Os impactos sobre os recursos hídricos tendem a afetar outros usuários, e pode desencadear problemas complexos de gestão, entretanto quando o desaguamento é bem conduzido pode gerar benefícios e aumentar a disponibilidade local de recursos hídricos (BERTACHINI *et al.*, 2003). Para Domingues *et al.* (2006), o sucesso de uma operação em mineração depende, em grande parte, da resolução adequada de suas interações com a água, de forma contínua e dinâmica, possibilitando a atualização e adequação ao longo de todo o período de operação da mina.

O conhecimento do fluxo dos corpos hídricos, sejam superficiais ou subterrâneos é fundamental para nortear a implantação e operação de qualquer empreendimento mineiro. Sob o ponto de vista de Cabral *et al.* (2008) os modelos hidrogeológicos são ferramentas fundamentais para previsão e planejamento de situações reais, e podem ser classificados como físicos e matemáticos, sendo os primeiros suplantados pelo segundo. Os modelos matemáticos são divididos em analíticos e numéricos. Os analíticos utilizam soluções matemáticas deduzidas para situações simplificadas, onde são adotadas premissas a fim de padronizar e simplificar os cálculos. Em alguns casos esses modelos podem ser utilizados com sucesso, sem que haja a necessidade de elaboração de um modelo numérico.

Os modelos hidrogeológicos possibilitam a previsibilidade de situações reais, dessa forma podem antecipar o diagnóstico dos impactos negativos sobre os recursos hídricos causados pela atividade mineradora em uma área, permitindo um planejamento eficaz na execução de medidas mitigadoras ao longo da operação e fechamento da mina. Tendo em vista a atividade de mineração iniciada em 2015 em uma microbacia hidrográfica localizada na margem direita, a cerca de 150 m do leito do Ribeirão Graipu, que abastece a cidade de Guanhães, e que a crise hídrica no município foi atribuída pela população à operação da cava nesse período (informação verbal¹), tem-se como hipótese que houve um impacto nos recursos hídricos e nos processos de escoamento e drenagem. Durante a operação da cava houve um bombeamento contínuo de água, que naturalmente interfere na dinâmica do escoamento subterrâneo e superficial. Essa interferência pode alterar a vazão disponível para captação e perenidade deste sistema.

Diante disso, o objetivo central deste estudo é interpretar, de forma analítica e utilizando parâmetros hidrológicos e hidrogeológicos reais, o impacto da cava em uma microbacia do Ribeirão Graipu. Assim como elaborar um modelo analítico para prever situações reais de entrada e saída de água da cava, a fim de classificar qualitativamente o impacto causado considerando o cenário atual da atividade.

¹ Informação verbal obtida através de conversas com o Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Guanhães-MG e observação pessoal no município de Sabinópolis-MG e Guanhães-MG.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir serão abordados temas relevantes associados à atividade de mineração, à geologia da região, à hidrogeologia, ao escoamento superficial e à modelagem hidrogeológica.

2.1 A Atividade de Mineração - Impactos Positivos e Negativos

De acordo com Ataíde (2017) os recursos minerais são imprescindíveis para a realização da maior parte das atividades humanas, desde as necessidades elementares até o desenvolvimento de artigos utilizadores de modernas tecnologias. Desse modo, a mineração é um dos setores básicos da economia do país, e contribui de forma significativa para o bem estar e a melhoria da qualidade de vida das gerações atuais e futuras, sendo fundamental para o desenvolvimento de uma sociedade equânime, desde que seja operada com responsabilidade social, baseada nos preceitos do desenvolvimento sustentável (FARIAS, 2002).

O setor mineral, de acordo com Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), apesar de ocupar apenas 0,5 % de todo o território nacional, tem participação fundamental no PIB e representa 1,4% do PIB do País, no período de julho de 2017 a junho de 2018, alcançou um faturamento de US\$ 32 bilhões, e exportou mais de 403 milhões de toneladas de bens minerais, para isso gerou 180 mil empregos diretos e mais de 2 milhões postos de trabalho indiretos (IBRAM, 2018).

Nesse contexto pode-se destacar o estado de Minas Gerais como um dos pioneiros na atividade minerária do país, tendo representativa participação no valor gerado pela indústria extrativa mineral, segundo Ibram (2020) 36% do valor gerado no Brasil no 3º trimestre de 2020 foi oriundo do estado de Minas Gerais, atrás apenas do estado do Pará, responsável por 43% desse valor.

A atividade minerária, apesar de possuir grande representatividade no contexto econômico, possui uma característica de rigidez locacional e traz consigo inúmeros impactos ambientais e sociais para os locais onde é realizada (CONCEIÇÃO *et al.*, 2018).

De acordo com Mechi e Sanches (2010) os processos geológicos que dão origem aos depósitos minerais também condiciona a distribuição deles na crosta terrestre, essa peculiaridade associa-se ao termo rigidez locacional, que por sua vez restringe a

implantação dos empreendimentos minerários às áreas de ocorrência das jazidas. Na visão de Ataíde (2017) a atividade minerária goza de algumas prerrogativas, a exemplo da possibilidade de ser exercida em Áreas de Preservação Permanente (APPs), visto que só pode ser desenvolvida na área de ocorrência natural do minério e ser considerada de interesse social. De acordo com o aludido autor a atividade está condicionada à exaustão da jazida e necessariamente é causadora de impactos ambientais negativos, mas é válido ressaltar que nesse contexto, além dos impactos negativos, existem impactos positivos no âmbito do desenvolvimento econômico e social.

Segundo o Conselho Nacional de Meio Ambiente o impacto, como forma de percepção, está condicionado a qualquer alteração no meio ambiente relacionada a atividade humana, dessa forma pode ser positivo ou negativo, e de ordem biológica, física e/ou socioeconômica (CONAMA, 1986). Dentre os impactos positivos causados pela mineração pode-se apontar o desenvolvimento econômico e social regional. De acordo com Herrmann² (1995) *apud* Ataíde (2017) a mineração está na base de todas as demandas sociais, fornecendo subsídios necessários à sua manutenção e desenvolvimento, além de remunerar os principais setores da economia: o comércio, a indústria primária e a de transformação dos bens minerais em produtos destinados à indústria. Deste modo a atividade minerária favorece o crescimento de uma nação e desenvolvimento da região onde ela ocorre, uma vez que aumenta o poder de compra da população e garante melhor qualidade de vida, através da geração de emprego, como consequência aquece o comércio local, além de incentivar social e economicamente outras atividades na região, tendo em vista a carga tributária que incide sobre a atividade que é revertida como forma de compensação pelo uso do bem mineral.

Ainda no âmbito social é importante destacar que atrelado ao benefício de geração de emprego e renda, a atividade mineradora pode causar um aumento significativo da população local, visto que importa mão-de-obra e serviços não disponíveis na região, e consigo a expansão urbana desordenada e transtorno ao tráfego urbano. Na perspectiva de Pontes *et al.* (2013) os impactos associados à competição pelo uso e ocupação do solo causados pela mineração, geram conflitos socioambientais, devido à expansão

² HERRMANN, Hildebrando. Mineração e meio ambiente: metamorfoses jurídico-institucionais. 355 fls. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1995.

desordenada e à falta de controle dos loteamentos nas áreas limítrofes ao empreendimento, sendo necessárias constantes reavaliações nas técnicas utilizadas para operação da mina, a fim de evitar situações de impasse entre as empresas do setor mineiro e a população localizada no entorno do empreendimento.

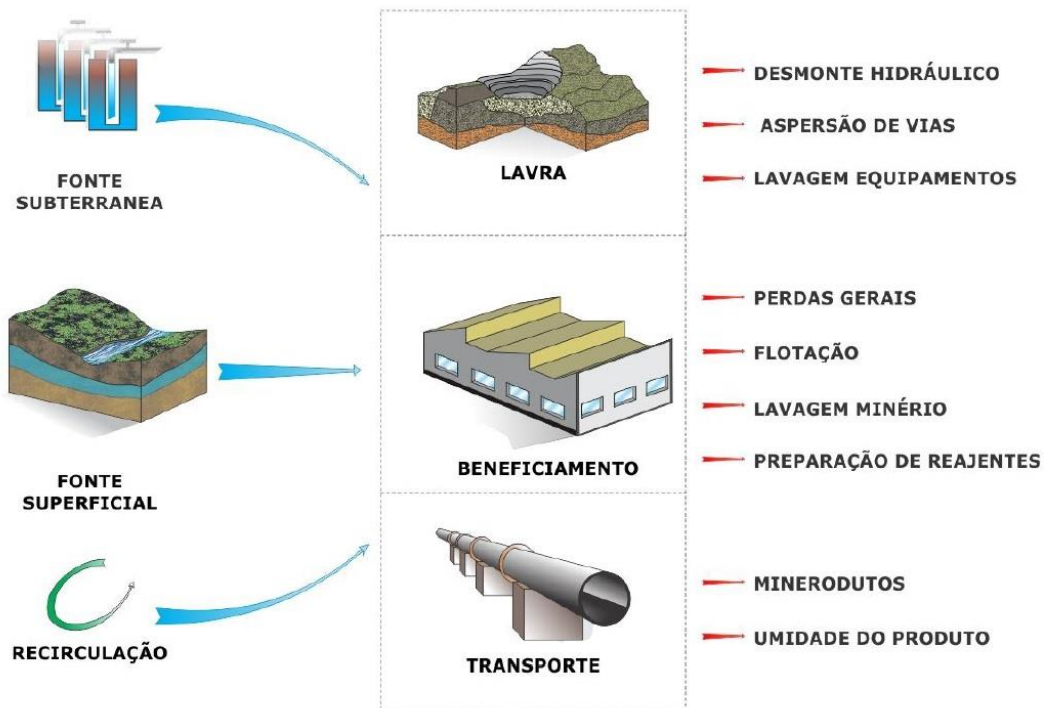
Nesse contexto, quando se fala em meio ambiente, o impacto ambiental negativo está intrínseco na mineração, visto que é uma atividade que se dá por meio da extração de um recurso natural finito, não sendo possível repor o bem mineral extraído ao ambiente. Ataíde (2017) entende que ainda que a área degradada seja recuperada o impacto ambiental subsistirá, pois, as medidas mitigadoras não possuem o condão de devolver à jazida o minério explorado.

Além do impacto ambiental irreparável, considerando a extração do recurso natural não renovável, existem outros impactos de ordem física e biológica. Na visão de Conceição *et al.* (2018) a rigidez locacional da mineração faz com que depósitos minerais economicamente viáveis ocorram em regiões ambientalmente sensíveis, com relevante biodiversidade e riqueza hídrica. De acordo com Farias (2002) os principais problemas ambientais oriundos da mineração podem ser divididos em quatro categorias, poluição do ar, poluição sonora, subsidência do solo e alteração nos recursos hídricos. Já para Mechi e Sanches (2010), praticamente toda atividade de mineração implica supressão de vegetação ou impedimento de sua regeneração natural, associado a isso tem-se a remoção do solo superficial de maior fertilidade a fim de alcançar o corpo mineralizado, tornando o solo remanescente propício a processos erosivos. No mesmo sentido, a poluição do ar está ligada à materiais particulados (poeira) suspensos pela atividade de lavra, beneficiamento e transporte, além da queima de combustíveis, tendo em vista esses processos pode-se vislumbrar o impacto da poluição sonora, considerando a geração de ruídos e vibrações, provenientes da operação da mina em geral.

A qualidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos também pode ser alterada, assim como o regime hidrológico e hidrogeológico regional, levando em conta o carreamento de partículas sólidas, lixiviação de resíduos contaminados, uso do recurso hídrico na mina e necessidade de rebaixamento do nível de água à medida que à exploração do minério avança e é necessário aumento da profundidade do nível da lavra (MECHI e SANCHES, 2010).

Além do uso direto de água nos processos comuns de produção, que acontece em três etapas, lavra, beneficiamento e transporte (Figura 1), existem casos em que a jazida ou o nível de avanço da lavra estão no nível, ou abaixo dele, de reservatórios subterrâneos de água, o que faz necessário o rebaixamento do nível de água para viabilizar a operação do empreendimento.

Figura 1 - Possíveis fontes e locais de consumo da água nas fases comuns de produção.



Fonte: FREITAS, 2012, p. 7.

A operação de rebaixamento do lençol freático é comumente realizada na mineração, visto que, grande parte dos depósitos minerais está situada abaixo da superfície piezométrica dos aquíferos ou está associado a um reservatório subterrâneo (CONCEIÇÃO *et al.*, 2018). A prática do rebaixamento deve ser muito bem gerida, uma vez que pode gerar diversos impactos no meio ambiente. No ponto de vista de Bertachini *et al.* (2003), a atividade de rebaixamento de nível de água em mineração tem potencial considerável na geração de impactos nos recursos hídricos, que tendem a afetar outros usuários, entretanto, o desaguamento de uma cava pode aumentar a disponibilidade de

recursos hídricos regionais, e o que era um impacto negativo pode se tornar um benefício, a depender do programa de gestão aplicado no empreendimento.

De acordo com Domingues *et al.* (2006) o desaguamento subterrâneo na mineração é um procedimento caro e complexo. Para uma gestão hídrica eficiente é fundamental planejar e prever, a curto, médio e a longo prazo, a temática da água na região da mina, através de estudos bem detalhados, que culminem na modelagem do fluxo de água daquele local, com maior fidelidade possível dos comportamentos hidrológicos, hidrogeológicos e do balanço hídrico ao longo do tempo.

2.2 Contexto geológico regional de Serro

A área deste trabalho encontra-se à leste da Serra do Espinhaço Meridional e da Serra da Serpentina, em Minas Gerais, na extremidade leste da Folha Serro (SE-23-Z-B-IV), caracterizada por três unidades litoestratigráficas, o Complexo Basal, a Formação Superior do Grupo Guanhães e a Formação Média do Grupo Guanhães, sendo todas as unidades de idade predominantemente arqueana. De acordo com Grossi Sad (1997) a região é constituída por rochas pré-cambrianas cristalinas e rochas metassedimentares e metavulcânicas, injetadas por granitos, ultramáficas e máficas.

Segundo Knauer & Grossi Sad (1997) o Complexo Basal, engloba rochas granitóides gnaissificadas, em parte migmatizadas, além de gnaisses bandados. A porção do complexo, localizado a leste da Serra do Espinhaço, é constituído por duas faixas principais separadas por rochas do Grupo Guanhães. Uma das faixas bordeja o Supergrupo Espinhaço, enquanto a outra se desenvolve na área de Guanhães, ocupando o núcleo de uma estrutura antiformal, parcialmente envolvida por rochas do Grupo Guanhães. A faixa externa que se desenvolve na área região estudada é constituída por granitóides do tipo TTG (tonalito-trondhjemito-granodiorito), que variam de trondhjemito até granito, aparentemente predominam granodiorito. Essa faixa do complexo mostra-se muito deformada e gnaissificada, e foi denominada pelos autores como Batólito de Guanhães.

Grossi Sad *et al.*, 1990b descreve o Grupo Guanhães constituído por rochas supracrustais de origem sedimentar e vulcânica. As primeiras incluem xisto aluminoso, xisto grafitoso, quartzito, quartzito ferruginoso, formação ferrífera, formação manganífera,

xistos calciossilicáticos, mármore e gnaisses grauvaquianos e as segundas incluem xistos ultramáficos e máficos. As rochas do grupo ocorrem como ilhas alongadas e isoladas no interior do Complexo Basal.

De acordo com mapeamento regionais (Knauer & Grossi Sad, 1997) o Grupo Guanhães, localizado a leste da Folha Serro, é dividido em três unidades geológicas, a Formação Inferior, representada por gnaiss xistoso, a Formação Média constituída de itabirito (formação ferrífera bandada) e quartzito ferruginoso, com quantidades variáveis de xisto carbonático e a Formação Superior, amplamente desenvolvida, mostra predomínio de rochas gnáissicas a biotita (localmente a anfibólio), migmatizadas ou não, sobre intercalações menores anfibolíticas e metaultrabásicas.

2.3 Hidrogeologia

A hidrogeologia é um ramo da geociência que estuda as águas subterrâneas quanto ao seu movimento, volume, qualidade e distribuição. Na visão de Bertachini (2011) a hidrogeologia está diretamente ligada ao armazenamento e movimentação de água subterrânea pelas formações geológicas, para facilitar os estudos e definições denominou-se essas relações de aquíferos.

2.3.1 Aquíferos

Para Diniz *et al.* (2014), aquífero refere-se ao estrato ou formação geológica capaz de armazenar e transmitir água por seus poros e fraturas, de forma que o homem possa aproveitá-la em quantidades economicamente viáveis para suprir suas necessidades. Já Bertachini (2011) através de suas observações define aquífero como uma formação geológica, formada por rochas permeáveis seja pela porosidade granular ou pela porosidade fissural, capaz de armazenar e transmitir quantidades significativas de água.

Dessa forma o conceito de aquífero está relacionado à necessidade local, tendo em vista que um aquífero caracterizado como pobre, pode ser considerado como um aquífero razoável, ou até bom, de acordo com a demanda regional.

Segundo Diniz *et al.* (2014) de uma forma geral existem dois tipos básicos de aquíferos considerando as características dos domínios hidrogeológicos onde ocorrem, os meios porosos (isotrópicos) e os meios fraturados (anisotrópicos). Os domínios

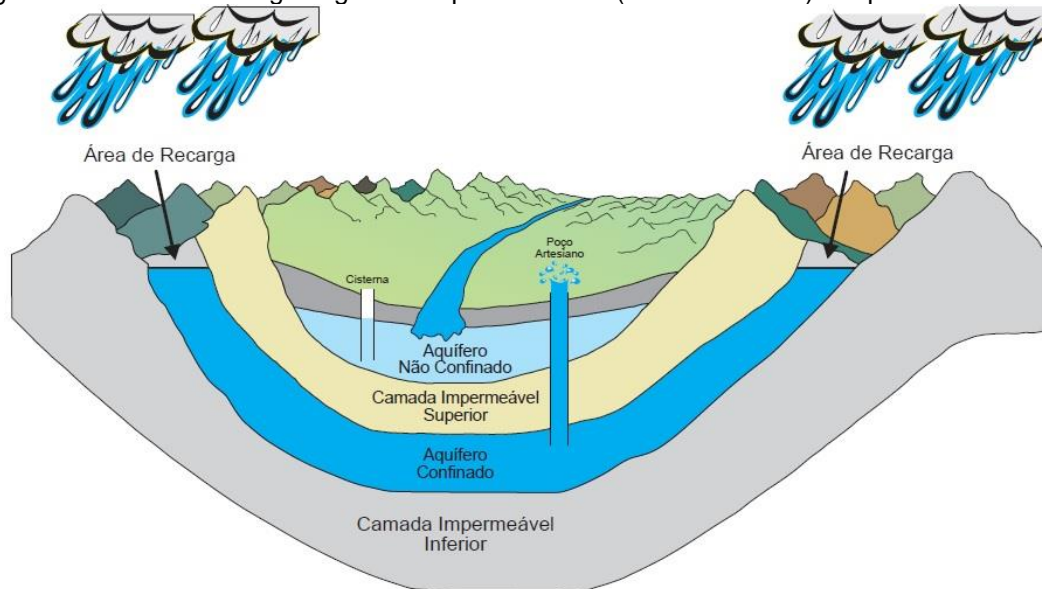
anisotrópicos são responsáveis por uma parcela significativa da ocorrência de água subterrânea, normalmente compostos por rochas carbonáticas (aquíferos cársticos) e por rochas cristalinas (aquíferos fraturados). O comportamento hidráulico nesses meios é uma característica peculiar de cada unidade e está diretamente ligada à disposição das estruturas de armazenamento de água (fratura, fendas, falhas), diferente de aquíferos porosos. Almeida (2016) diz que aquíferos porosos são compostos por rochas sedimentares e sedimentos não consolidados (solo), onde podem ser encontrados arenitos, siltitos, areias e cascalho.

Outro critério para classificação de aquíferos, aplicado apenas aos meios porosos é feito em função da pressão hidrostática a qual está submetida à água subterrânea. Através deste referencial os aquíferos porosos podem ser divididos em confinados e livres (DINIZ *et al.*, 2014).

De acordo com Ferreira *et al.* (2007) os aquíferos confinados apresentam camadas limítrofes com menor permeabilidade (confinante) que submete as águas em qualquer ponto a uma pressão superior à atmosférica, já os aquíferos livres são aqueles cujo limite superior é a superfície de saturação ou freático na qual todos os pontos se encontram à pressão atmosférica.

Sob a ótica de Diniz *et al.* (2014) os aquíferos livres, também chamados de freáticos, são constituídos por formações geológicas de características permeáveis, parcialmente saturadas de água, possuem uma base formada por uma camada impermeável, ou semipermeável. Neste aquífero existe uma superfície livre de água que se encontra sujeita apenas à pressão atmosférica (superfície piezométrica) e o nível da água varia de acordo com a quantidade de chuva. A dinâmica entre aquíferos livres (não confinados) e confinados (Figura 2), permite a recarga de reservatórios subterrâneos e conseqüentemente a manutenção das nascentes, que são fundamentais para a longevidade dos cursos hídricos superficiais. De acordo com Brasil (2012), nascente é um afloramento natural do lençol freático que apresenta perenidade e dá início a um curso d'água.

Figura 2 - Dinâmica hidrogeológica de aquíferos livres (não confinados) e aquíferos confinados.



Fonte: PINTO-COELHO *et al.*, 2015, p. 92.

2.3.2 Recarga de Aquíferos

O conceito de recarga de aquíferos a princípio pode ser confundido com o conceito de infiltração, de acordo com Viviani-Lima (2007) infiltração é a água que percola da superfície para a zona não saturada, já recarga é uma porção dessa infiltração que atinge o nível de água subterrâneo. Nem toda água que infiltra se torna recarga, ela pode interceptar horizontes de baixa condutividade e ser direcionada para depressões próximas, onde escoar e/ou evapora, ao invés de se juntar ao sistema de água subterrânea regional.

A recarga de um aquífero pode ser definida de modo geral como a água que atinge o aquífero por qualquer direção, de baixo, de cima ou lateralmente (LERNER³, 1997 *apud* SILVA, 2018). Na visão de Maldaner (2010), recarga pode acontecer de forma natural, através das chuvas, rios e lagos, e de forma não-natural, através de irrigações, vazamentos em redes de distribuição de água, coleta de esgoto e fossas. Para Bertachini (2011), o regime de recarga e descarga de aquíferos está diretamente ligado às precipitações, escoamento superficial, infiltração e nascentes, dessa forma está fortemente conectado às características do ciclo hidrológico regional.

³ LERNER, D.N. (1997). Groundwater Recharge. In: Saether. O.M.; de Carit, P. (eds.). Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments. A. A: Bulkma, Rotterdam. p. 109-150.

De acordo com Mourão (2007), os principais fatores que controlam a recarga correspondem ao clima, topografia, tipos de solo, contexto geológico-estrutural, a cobertura vegetal e as formas de uso e ocupação do solo. A combinação desses diversos fatores determinará as taxas de recarga para os aquíferos, dessa forma para quanto maior e mais detalhado for o conhecimento das características intrínsecas e extrínsecas da região, mais precisa será a avaliação dessa variável.

Segundo Lerner ⁴(1997) *apud* Viviani-Lima (2007) a recarga natural pode ocorrer por três mecanismos principais:

- Recarga direta: a água proveniente da chuva infiltra e o excedente ao déficit de umidade do solo e evapotranspiração percola de forma vertical direta pela zona não saturada até atingir o nível de água do aquífero.
- Recarga indireta: percolação de água para o aquífero através de corpos de água superficiais, como rios e lagos.
- Recarga localizada: forma intermediária de recarga, resultante da acumulação de água na superfície com ausência de canais bem definidos, como poças e bacias de infiltração.

Para estimativa e quantificação da taxa de recarga é necessário definir o método que envolve o maior número de informações e dados que se tem disponíveis da área de interesse. De acordo com Pinto (2010), os métodos utilizados para a avaliação da recarga produzem estimativas em várias escalas de tempo e espaço e englobam uma larga faixa de complexidade e extensão. Para Feitosa *et al.* (2008), para aquíferos em regime estacionário (permanente), a recarga é igual a descarga, ou seja, em ambientes de armazenamento e transmissão de água onde as características hidráulicas do aquífero não mudam em função do tempo, pode-se considerar que a recarga do mesmo é igual a descarga.

⁴ Lerner, D.N. 1997. Groundwater recharge. *In*: Saether, O.M.; de Carit, P. (eds.). Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments. A. A. Bulkma, Rotterdam. p. 109-150.

2.3.3 Condutividade Hidráulica (K)

Segundo Betim (2013) a condutividade hidráulica é um coeficiente proveniente da Lei de Darcy, que descreve o fluxo da água em meios porosos. Para Feitosa *et al.* (2008), em um meio isotrópico, condutividade hidráulica refere-se à facilidade de uma formação aquífera exercer a função de um condutor hidráulico, e pode ser entendida como sendo numericamente igual à vazão que atravessa uma área unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário.

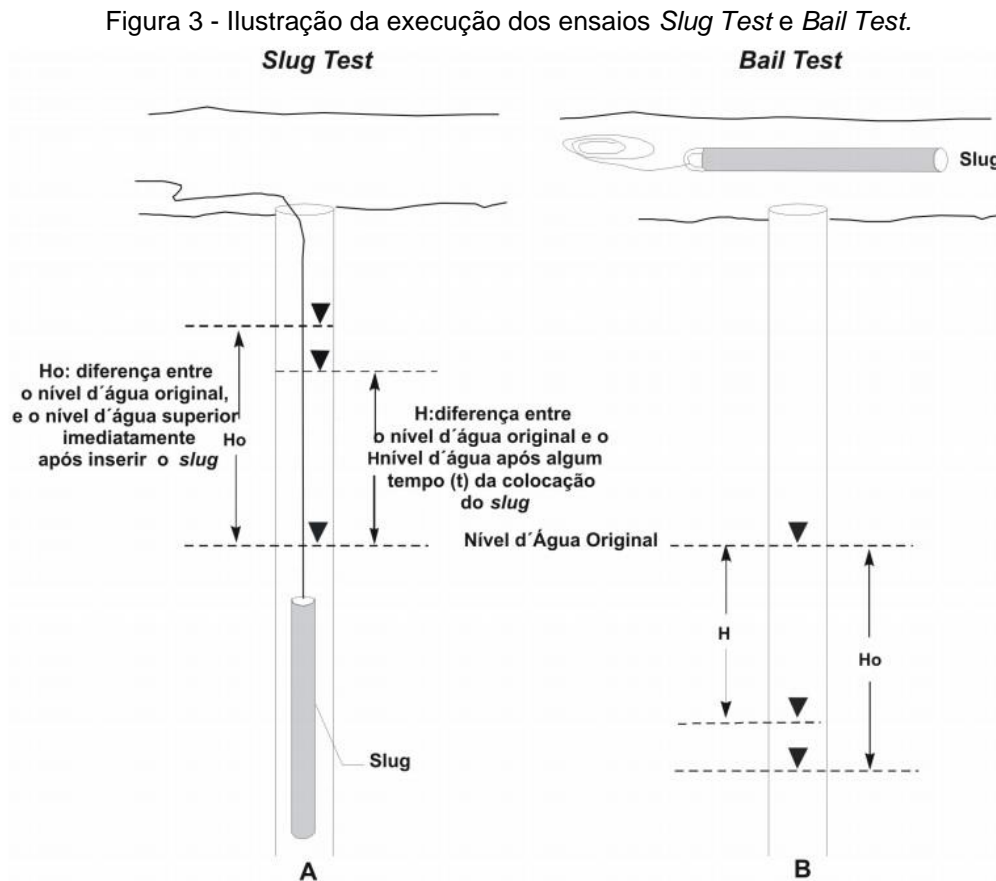
Na visão de Pinheiro *et al.* (2017) a condutividade hidráulica é uma das propriedades de maior relevância para estudo da movimentação da água, substâncias químicas e soluto no solo. Para os autores esse parâmetro não depende tão somente das características do meio poroso, mas também das propriedades do líquido permeante. Para determinação desse coeficiente são necessários ensaios que podem ser realizados em campo ou em laboratório, a depender da escala que se deseja. De acordo com Ferraz *et al.* (2015) os ensaios de campo são os mais frequentes, uma vez que possuem boa representatividade e baixo custo. Os ensaios de laboratório apresentam maior controle e precisão, entretanto são realizados em amostras pontuais portanto não representam a heterogeneidade da maioria dos materiais geológicos, para Pinheiro *et al.* (2017) os ensaios de campo têm como grande vantagem envolverem uma massa de solo muito maior e, dessa forma, levam em consideração a heterogeneidade e anisotropia dos materiais.

De acordo com Baroni (2016) a anisotropia dos materiais é uma relação entre os vetores verticais (K_v) e horizontais (K_h) da condutividade hidráulica. Segundo Feitosa *et al.*, (2008) a condutividade hidráulica no sentido horizontal é maior que a condutividade hidráulica no sentido vertical, essa diferença se dá devido a geometria irregular das partículas que geralmente estão posicionadas com o lado plano para baixo e a sobreposição de camadas que compõem o aquífero. Todd (1980) relata valores para a relação K_v/K_h variando entre 0,1 e 0,5 para aluvião e quando há ocorrência de camadas de argila esse valor pode ser até 0,01.

A definição da condutividade hidráulica em campo pode ser feita através do *slug test*, tendo em vista à representatividade da área estudada. Carvalho *et al.* (2013) considera o uso dessa metodologia vantajosa, por ser de baixo custo, rápida, simples,

apresentar resultados compatíveis com os outros métodos e ser o mais utilizado para determinação da condutividade hidráulica no mundo, uma vez que é apropriada para uma ampla gama de poços de pequeno diâmetro.

O teste é realizado em zona saturada e consiste em elevar ou rebaixar instantaneamente um volume d'água em um poço de monitoramento (piezômetro) de reduzido diâmetro através da introdução (*slug test*) ou retirada (*bail test*) de um cilindro sólido (tarugo) de dentro do poço (BETIM, 2013). De acordo com Fiori (2010), é fundamental cadastrar as condições iniciais do nível de água dentro do poço (nível estático), visto que esses ensaios avaliam a variação de altura na coluna d'água e o tempo necessário para recuperação ou rebaixamento do nível até atingir as condições originais. As medições do nível podem ser realizadas manualmente, com auxílio de medidores de nível, ou automaticamente, através do uso de um transdutor de pressão (acoplado a um computador). A figura 3 ilustra a forma de execução dos testes.



A partir do monitoramento das variações do nível d'água em função do tempo, obtém-se dados que, em conjunto com as características geométricas do poço e um método de interpretação adequado, encontra-se o valor de condutividade hidráulica nas imediações do poço de monitoramento ensaiado (SILVA, 2008). De acordo com Oliva *et al.* (2005) a interpretação dos dados obtidos através do *slug e/ou bail test* pode ser feita utilizando as metodologias propostas por Hvorslev (1951) e Bouwer; Rice (1976).

2.4 Escoamento Superficial

O escoamento superficial é uma fase do ciclo hidrológico, relacionada ao deslocamento da água sobre a superfície do solo, e representa um componente do balanço hídrico de uma bacia. Para Paz (2004), a principal origem do escoamento superficial são as chuvas, inicialmente a água acumula nas depressões dos terrenos e infiltra no solo, à medida que a intensidade da chuva ultrapassa a capacidade de infiltração e acumulação a água escoar sobre a superfície, esse é o chamado escoamento superficial livre.

O volume do escoamento superficial depende de fatores relacionados às características de natureza geológica, climática e fisiográfica, tais como, área da bacia hidrográfica, geomorfologia, grau de saturação e permeabilidade do solo, cobertura vegetal, quantidade e intensidade de precipitação (ALENCAR *et al.*, 2006). O tipo de vegetação e o uso e ocupação do solo influencia diretamente o escoamento superficial, segundo Bruijnzeel⁵ (1996) *apud* Silva (2014) quanto menor a cobertura vegetal maior é o escoamento.

De acordo com Lorenzon *et al.* (2015) escoamento superficial é um dos processos mais estudados e modelados em estudos hidrológicos, um componente muito importante no balanço hídrico, devido ao seu potencial para causar erosões, enchentes e assoreamento em cursos d'água. Existem diversas formas para estimativa do escoamento superficial, a escolha do método deve considerar as características da área, a disponibilidade dos dados e qual o nível de assertividade pretende-se alcançar.

⁵ BRUIJNZEEL, L.A. Predicting the hydrological impacts of tropical Forest conversion: The need for integrated research. Capítulo 2 de “**Amazonian Deforestation and Climate**” Eds: Gash J H C, Nobre C A, Roberts J M e Victoria R L John Wiley & Co: Chichester, Inglaterra. 1996.

Segundo Pruski *et al.* (2003) em bacias hidrográficas pequenas onde pretende-se estimar o escoamento superficial baseado em dados de chuva, pode-se aplicar o Método Racional.

Segundo Barbosa Júnior (2014), o método racional é largamente utilizado no Brasil, Estados Unidos e outros países devido a simplicidade de aplicação com relação aos outros métodos. Todavia, a utilização do método racional deve ser restrita a pequenas bacias hidrográficas, ou simplesmente, pequenas superfícies de drenagem, em áreas inferiores a 2,5 km² (250 hectares). De acordo com Pruski *et al.* (2003) esse método considera que a vazão máxima, causada por uma chuva constante e de intensidade uniforme, ocorre quando toda a área de drenagem contribui para o escoamento superficial em um ponto de observação. A vazão máxima resultante é dada pela relação entre a área de drenagem, a intensidade da chuva e o coeficiente de escoamento superficial, que é definido com base na razão entre o volume de água escoado e o volume de precipitação (CARVALHO *et al.*, 2006).

2.5 Modelagem Hidrogeológica

Diante da subjetividade do armazenamento de água subterrânea, a modelagem hidrogeológica é fundamental para previsão de cenários futuros. De acordo com Feitosa *et al.* (2008), os modelos de um modo geral são ferramentas fundamentais para planejamento e previsão de situações reais, e são representações simplificadas de uma situação real, e como tal, apresentam suas limitações. Um modelo matemático, faz as representações através de equações matemáticas, que no caso da hidrogeologia regem o fluxo de água subterrânea. Dessa forma, Carvalho *et al.* (2018) entende que a modelagem matemática é fundamental para o entendimento dinâmico de sistemas complexos de hidrogeologia, além de ser uma ferramenta orientativa para um programa de gestão de recursos hídricos.

Segundo Feitosa *et al.* (2008) os modelos matemáticos podem ser classificados como analíticos e numéricos. Para Carvalho (2013), os modelos analíticos são mais simples e exigem uma menor quantidade de dados, podendo ser aplicados em diversas situações, em contrapartida são menos realistas que os numéricos, que por sua vez considera as complexidades hidrogeológicas e por isso apresenta bons resultados,

entretanto demandam alto custo e tempo. Feitosa *et al.* (2008) afirma que apesar de modelos analíticos utilizarem soluções matemáticas deduzidas, podem ser aplicados em casos práticos simples com sucesso, sem a necessidade de elaboração de modelos numéricos.

Os modelos analíticos são utilizados em situações onde se tem poucos dados disponíveis e não se vislumbra altos investimentos financeiros para estudos hidrogeológicos, nesse contexto encaixam-se empreendimentos minerários em estágios iniciais de desenvolvimento da mina. É importante mencionar que apesar das soluções analíticas apresentarem resultados satisfatórios em determinados casos, não são adequadas para todas as situações. Portanto, deve-se comparar cuidadosamente os resultados das premissas matemáticas encontradas às condições conhecidas ou inferidas da área (MARINELLI e NICCOLI, 2000).

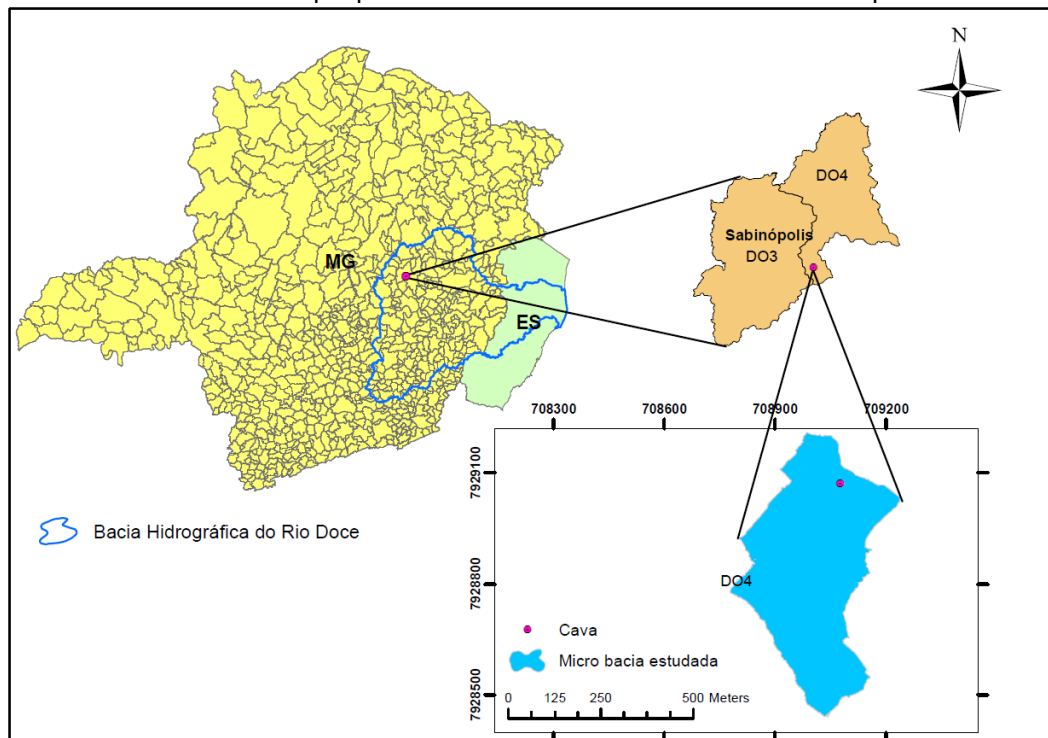
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os trabalhos de campo para levantamento de dados da microbacia estudada tiveram início em outubro de 2019 e foram finalizados em maio de 2020.

3.1 Caracterização da área de estudo

A microbacia estudada (Figura 4) está inserida nas regiões geográficas intermediária de Governador Valadares e imediata de Guanhães, no município de Sabinópolis, na porção leste de Minas Gerais (BRASIL, 2017). De acordo com Ecoplan-Lume (2010), este município está inserido na bacia hidrográfica do Rio Doce, esta possui uma área de drenagem de aproximadamente 86.715 km², abrangendo 202 municípios no Estado de Minas Gerais, o que corresponde a 86% da área da bacia, e 28 municípios no Estado Espírito.

Figura 4 - Localização da área de estudo e sua inserção na bacia hidrográfica do Rio Doce, no Estado de Minas Gerais. Destaque para as UPGRH DO3 e DO4 determinadas pelo IGAM.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A drenagem do município de Sabinópolis segundo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM, 2010) está dividida entre duas unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos (UPGRH), as sub bacias do Rio Santo Antônio (DO3) e do Rio Suaçuí Grande (DO4), sendo a segunda em termos de área a maior unidade da bacia do rio Doce, ocupando uma área de 21.555 km². A bacia do Rio Suaçuí Grande está totalmente inserida no estado de Minas Gerais e abrange a microbacia do Ribeirão Graipu. A nascente do Ribeirão Graipu está situada no município de Sabinópolis e sua foz em Guanhães, sendo principal curso d'água utilizado no abastecimento público do município de Guanhães.

Segundo Martins *et al.* (2018) a bacia hidrográfica do Rio Doce apresenta dois tipos climáticos de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o Aw, tropical com inverno seco, e Cwa, temperado quente e inverno seco, indicando predominância do Aw. O regime pluviométrico da bacia é sazonal e apresenta dois períodos bem distintos, o período chuvoso, compreendido de outubro a março, com os maiores índices em dezembro, e o período seco, que se estende de abril a setembro, apresentando uma estiagem mais crítica de junho a agosto, com pluviometria média anual está entre 1.000 a 1.500mm (ECOPLAN-LUME, 2010). A área de estudo reflete as características climáticas e pluviométricas da bacia, de acordo com o mapa climático atualizado de Köppen-Geiger proposto por Álvares *et al.* (2013), classifica o clima de Sabinópolis como Cwa, o município possui verões chuvosos e um período seco durante o inverno. A precipitação média anual é 1.493mm e temperatura média anual é 20°C (ÁLVARES *et al.*, 2013).

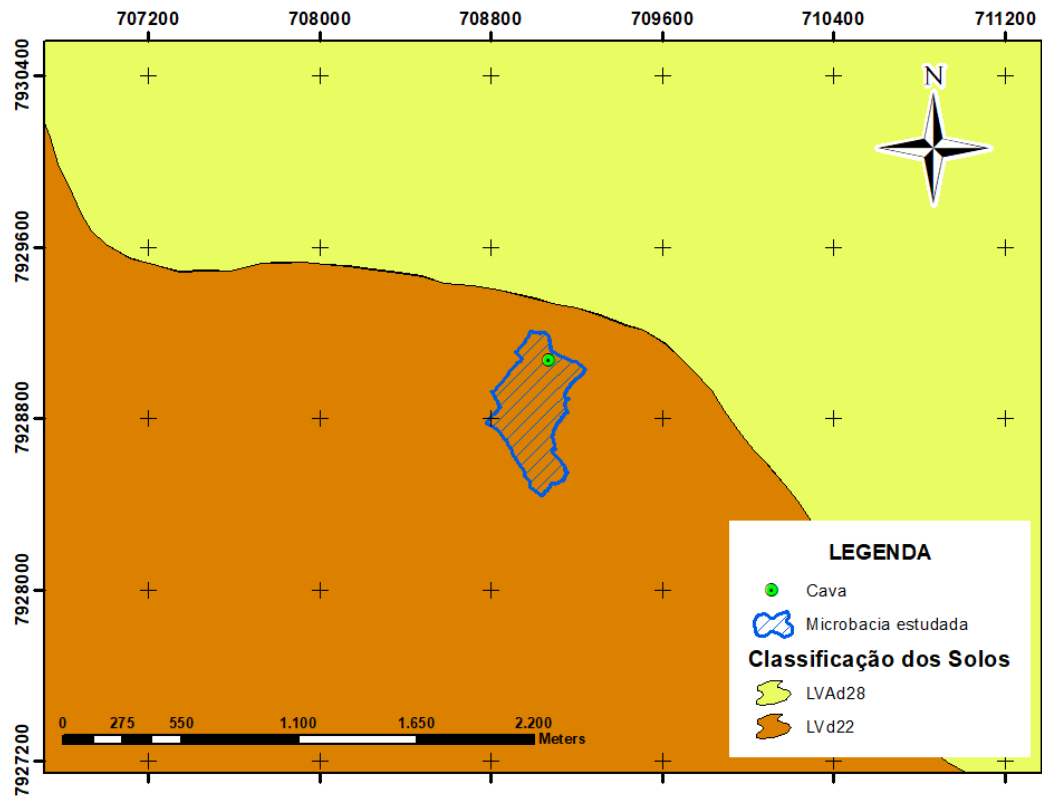
Para Machado *et al.* (2010) Minas Gerais apresenta um relevo que difere das outras regiões do País, devido a diversidade de quadros morfológicos presentes, tal diversidade é resultante da complexa atividade tectônica atuante nas rochas que compõe o escudo brasileiro. A bacia hidrográfica do Rio Doce tem os planaltos como forma de relevo predominante, segundo Ecoplan-Lume (2010) 70% é ocupada por planaltos dissecados do Centro-Sul e do Leste de Minas, constituídos predominantemente por formas de dissecação fluvial do tipo colinas e cristas, elaborados por rochas granito-gnáissicas do embasamento. A Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE – Sisema) mostra que a área de estudo está

localizada na região dos Planaltos do Leste de Minas, e apresenta colinas com altitude média de 852 m (SAAE, 2006).

A vegetação predominante em todo o Vale do Rio Doce possui características do bioma Mata Atlântica, em maior escala na bacia do Rio Suaçuí Grande, o remanescente de vegetação nativa virgem é caracterizado por Floresta Estacional Semidecidual, que representa apenas 25,31 % da área da bacia, as demais áreas são ocupadas por usos alternativos do solo, tendo como exemplo mais representativo a agropecuária, que ocupa 69% da área (ECOPLAN-LUME, 2010). No contexto local da área de estudo, segundo dados do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE, 2006), a microbacia do Ribeirão Graipu apresenta problemas de degradação ambiental, advindos da atividade agropecuária e ocupação antrópica desordenada.

Os solos que possuem maior ocorrência na região são os Latossolos Vermelho-Amarelos e Argissolos Vermelhos, esses ocupam 77,2 % da área da bacia do Rio Doce, nas demais áreas e em menor proporção ocorrem Argissolo Amarelo, Latossolo Vermelho, Argissolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo Háplico, Latossolo Amarelo, Gleissolo Háplico, Neossolo Litólico (ECOPLAN-LUME, 2010). De acordo com Fernandes Filho *et al.*, (2010) na área ocorre uma associação de solos classificada como LVd22 (Figura 5), composta basicamente por Latossolo Vermelho Distrófico típico (50%), Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico (25%) e Argissolo Vermelho Distrófico típico (25%), todos eles com textura argilosa ou muito argilosa, apresentando predominantemente argila em sua composição granulométrica.

Figura 5 – Mapa dos solos da região de estudo de acordo com a classificação de Fernandes Filho *et al.* (2010)

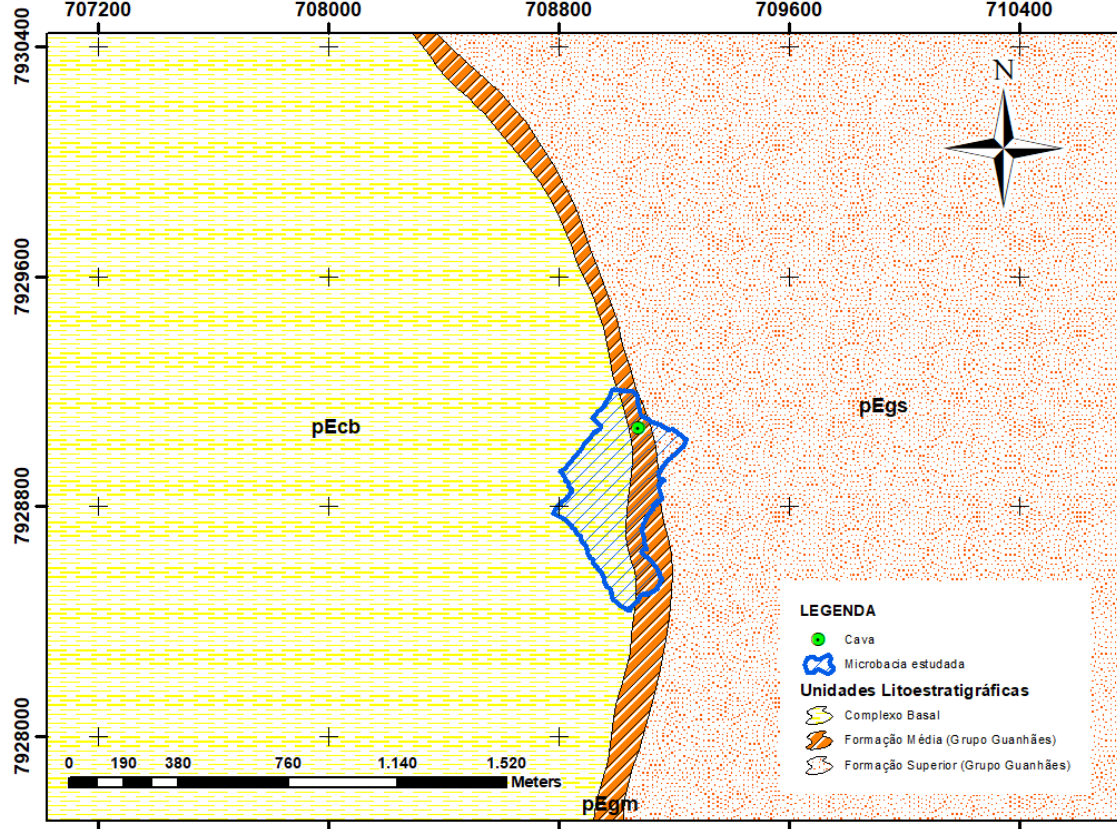


Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Em um contexto hidrogeológico regional a área está localizada sobre uma unidade estratigráfica classificada como embasamento fraturado indiferenciado, composta por rochas cristalinas e apresenta características anisotrópicas, típicas de um meio fraturado (DINIZ *et al.*, 2014). Contudo, a cava objeto do estudo, limita-se apenas ao aquífero mais próximo da superfície, classificado como poroso, livre e isotrópico.

A geologia da microbacia estudada é caracterizada por três unidades litoestratigráficas (Figura 6), o Complexo Basal, a Formação Superior do Grupo Guanhães e a Formação Média do Grupo Guanhães, sendo todas as unidades de idade predominantemente arqueana (GROSSI SAD, 1997).

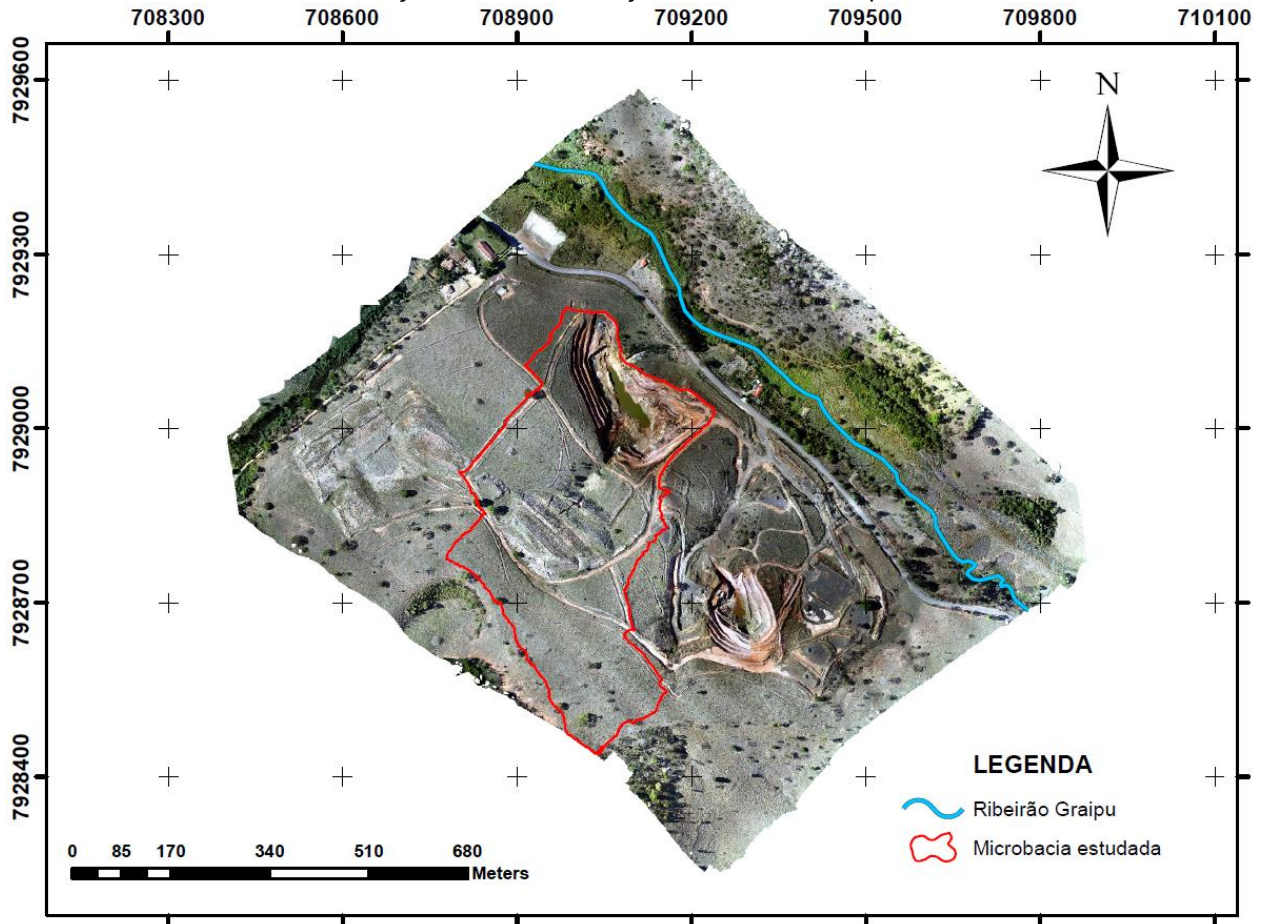
Figura 6 - Mapa geológico da região de estudo de acordo com a caracterização de Grossi Sad (1997).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A área de estudo (Figura 5) possui cerca de 22,5 hectares e abrange a cava de mineração paralisada, desenvolvida no período entre 2015 e 2016 para exploração de minério de ferro, a área de drenagem à montante e à jusante da cava e o trecho do Ribeirão Graipu, que pode estar dentro do raio de influência da cava.

Figura 7 - Ortofoto da região de estudo, com delimitação da microbacia onde houve o rebaixamento do lençol freático e indicação do Ribeirão Graipu.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

3.2 Delimitação da área de drenagem e detalhamento planialtimétrico da cava

A delimitação da área de drenagem foi realizada através de levantamento planialtimétrico realizado com Drone modelo Phantom 4 Pro®. O voo foi realizado no dia 12 de outubro de 2019, quando o lago formado na cava possuía menor cota e as condições climáticas favoreciam o voo. As fotos aéreas capturadas foram processadas com o software Agisoft Metashape Professional®. Como produto intermediário foi desenvolvido o modelo digital de elevação (MDE), modelo digital de superfície (MDS), curvas de nível (CN) de 1m em 1m e ortofoto da região onde está inserida a microbacia de estudo.

Os produtos intermediários foram ajustados no software ArcGis 10.2.2®, no qual foi possível obter as informações necessárias para o estudo. O modelo digital elevação,

foi utilizado para delimitação da área de drenagem à montante da cava através ferramenta “*basin*”. As curvas de nível de 1m em 1m foram utilizadas para gerar um MDS suavizado através da ferramenta “*Topo to raster*”, que permitiu uma interpolação das feições de relevo e, assim gerar curvas de nível com menor espaçamento, com intervalo de 0,25m. Com esse procedimento foi possível definir a cota de extravasão da cava fechada, a área da superfície da cava em cada cota e o volume entre as curvas de nível, por meio das ferramentas “*calculate geometry*” e “*polygon volume*”.

A profundidade do lago foi estimada em 0,75 metros, considerando informações⁶ de trabalhos anteriores realizados pelo SAAE do município de Guanhães.

O levantamento aéreo não possibilita o cálculo da área e do volume abaixo da superfície do lago, portanto os resultados das áreas da superfície da cava nas cotas superiores foram plotados em um gráfico de dispersão no Excel, e criou-se uma regressão linear (equação 1), com coeficiente de determinação (R^2) igual 0,9987, para calcular as áreas abaixo da lâmina d’água. O volume entre as cotas abaixo da superfície do lago foi calculado através da fórmula do volume do tronco de um cone (equação 2), por ser a forma geométrica com maior semelhança a uma cava de mineração.

$$y = 1276,3x - 958344 \quad (1)$$

Onde:

Y é a Área da superfície da cava (m^2)

X é a Cota (m)

$$V = \frac{\pi h}{3} (R^2 + Rr + r^2) \quad (2)$$

Onde:

V é o Volume do tronco do cone (m^3)

h é a altura (m)

R é o raio da base maior (m)

⁶ Informação verbal obtida através de conversas com o SAAE de Guanhães-MG em setembro de 2019.

r é o raio da base menor (m)

$$\pi = 3,14$$

Através do Excel®, calculou-se o volume entre as curvas de nível até a cota de extravasão da cava, os resultados foram comparados com os valores reais, obtidos através do levantamento planialtimétrico, para checagem e validação. O erro médio foi de 0,5 %. Portanto, foi considerado válido o uso da equação 2, para estimativa do volume abaixo da superfície do lago

3.3 Dados climatológicos

Os dados climatológicos relevantes para esse estudo são os relacionados a pluviometria e evapotranspiração, pois influenciam de forma direta no balanço hídrico local e no enchimento da cava. Em função da disponibilidade dos dados e distância com relação à área de estudo, foram definidas duas estações de monitoramento onde se vislumbra características climáticas semelhantes, a estação pluviométrica nº 01842007 para os dados de pluviometria e a estação meteorológica nº 83589 para os dados de evapotranspiração. Para obtenção das médias mensais foi utilizado o Excel® e adotou-se um período comum de série histórica compreendido entre 1968 e 2018 para as duas estações.

A estação pluviométrica está situada no município de Guanhães. Operada pela Agência Nacional das Águas (ANA), a estação tem posicionamento geográfico nas coordenadas latitude 18°46'12.00"S e longitude 42°55'48.00"O, encontra-se a aproximadamente 10 km da área de estudo.

A estação meteorológica está localizada em Conceição do Mato Dentro e sua operação é de responsabilidade do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A estação possui posicionamento geográfico nas coordenadas latitude 19°1'12.00"S e longitude 43°25'48.00"O, situada a aproximadamente 54 km da região de estudo.

Os dados de evapotranspiração disponíveis são provenientes de métodos empíricos de monitoramento, obtidos através de evaporímetros. De acordo com Paz (2004) este método proporciona condições mais favoráveis a evaporação, por apresentarem dimensões reduzidas e materiais condutores. Dessa forma para estimativa

da evapotranspiração real na microbacia estudada, aplicou-se um coeficiente de correção de 0,85, proposto por Doorenbos e Pruitt⁷ (1977) *apud* Cunha *et al.*, (2013).

3.4 Escoamento Superficial

O escoamento superficial na área de estudo foi calculado baseado no método racional, utilizado por Tucci (2000), através da equação 3.

$$Q = C \cdot i \cdot A \quad (3)$$

Onde:

Q é a vazão de escoamento superficial (m³/ano)

C é o coeficiente de escoamento superficial

i é o índice de precipitação na bacia (m/ano)

A é a área de drenagem total da bacia (m²)

O coeficiente de escoamento superficial foi calculado através da razão entre o volume escoado na bacia e o volume de precipitação, conforme proposto por Carvalho *et al.* (2006).

Considerou-se os valores 333 mm/ano e 341 mm/ano, como referência do volume de escoamento superficial, propostos por HIDROBR (2018) no estudo para regularização de vazão no ponto de captação de água atual do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) do município de Guanhães, que está localizado dentro da microbacia do Ribeirão Graipu.

Os volumes de escoamento superficial foram divididos pela precipitação anual obtida através dos dados pluviométricos, e a média dos valores encontrados, foi utilizada como coeficiente de escoamento superficial para esse estudo.

7 DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Crop water requirements. Rome: FAO, 1977. (Irrigation and drainage paper, 24).

3.5 Estimativa de Recarga

Considerando que em aquíferos em regime estacionário (permanente), pode-se considerar que a recarga é igual a descarga, conforme proposto por Feitosa (2008). O cálculo da recarga foi baseado na vazão de descarga de uma nascente perene localizada dentro da área da cava.

A medição da vazão da nascente ocorreu no dia 28/05/2020, baseado no método volumétrico, que consiste em registrar o tempo necessário para encher um recipiente de volume conhecido utilizando apenas a vazão da mesma (Figura 6), para isso foram utilizados um recipiente de 2 litros de volume e um cronômetro. O procedimento foi repetido 10 vezes. Após processamento dos resultados de volume e tempo, calculou-se vazão média da nascente, m^3/h .

É importante destacar que a vazão instantânea encontrada corresponde apenas ao volume da área da bacia de contribuição à montante da nascente. Dessa forma, a vazão, em m^3/ano , foi dividido pela área da bacia, calculada através do ArcGis®, obtendo-se o fluxo de descarga por unidade de área. Assim, estimou-se o fluxo de recarga anual da área de estudo.

Figura 8 - Procedimento de medição de vazão da nascente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

3.6 Cálculo da condutividade hidráulica (K)

A condutividade hidráulica foi obtida por meio de ensaios de *slugtest* e *bailtest*, realizados no dia 28/05/2020 em um piezômetro existente na área de estudo (Figura 7). Para a realização dos ensaios utilizou-se um tarugo com dimensões de 1 metro de comprimento por 1/2" de diâmetro, um medidor de nível d'água (NA) elétrico com fita métrica milimetrada, e uma prancheta para registro da variação do nível de água no piezômetro. As informações sobre o perfil construtivo do poço não são conhecidas, portanto para esse estudo foi considerado que, o piezômetro não possui revestimento e o comprimento do filtro é 30 m, valor estimado com base na profundidade total do poço de 39 m, medida em campo.

Figura 9 - Piezômetro instalado na microbacia de estudo e utilizado para realização dos ensaios de *slugtest* e *bailtest*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A análise e interpretação dos dados foram realizadas segundo os critérios de Hvorslev (1951), no qual condutividade hidráulica é calculada pela equação 4. Os

parâmetros da equação são associados ao piezômetro (Figura 8) e foram mensurados com o auxílio de ferramentas do Excel®.

$$K = \frac{r^2 \ln(L/R)}{2LT_0} \quad (4)$$

Onde:

K é a Condutividade Hidráulica (m/s)

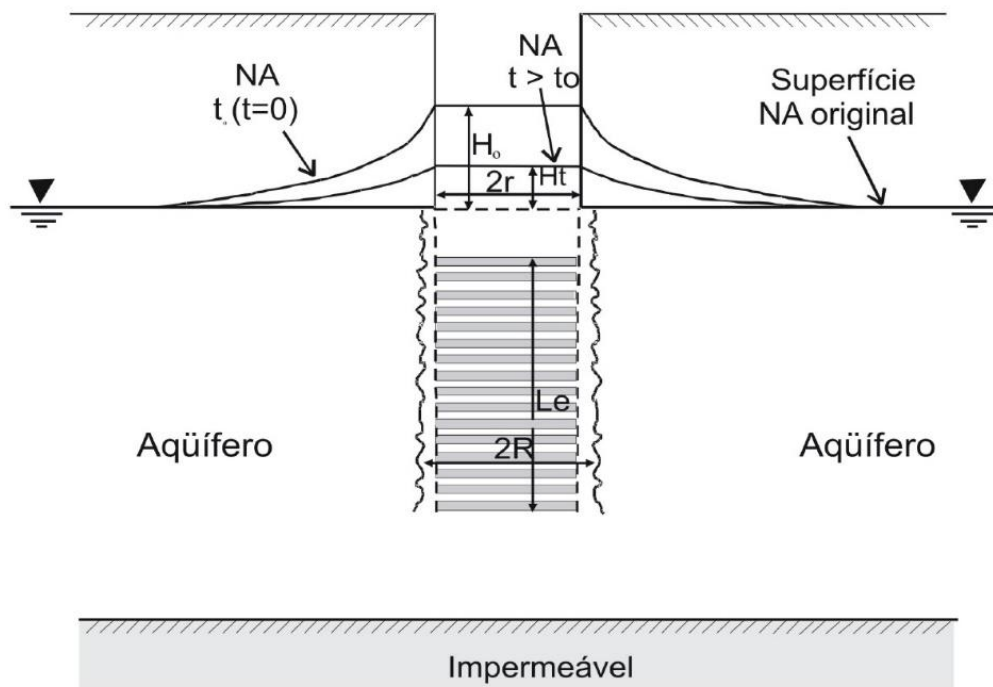
r é o Raio do revestimento (m)

R é o Raio do poço (m)

L é o Comprimento do filtro (m)

T₀ é o Tempo em que H/H₀ = 0,37 (o nível d'água está a 37% da posição inicial).

Figura 10 - Desenho esquemático do slugtest e os parâmetros geométricos do método de Hvorslev (1951).



Fonte: OLIVA *et al.*, 2005, p. 6.

Para entendimento, a razão H/H_0 , representa a relação entre a variação da altura do nível de água durante o ensaio e a variação total da altura do nível d'água com relação ao nível estático do poço medido no início do teste, ou seja, H é nível de água medido em um instante "t" durante o ensaio e H_0 é o nível de água medido no instante t_0 , no início

do ensaio após a introdução ou retirada do tarugo. Os valores da razão H/H_0 foram plotados em um gráfico com escala semi-logarítmica em função do tempo dado em minutos, e através da interpolação dos dados leu-se no eixo do tempo o valor correspondente a 0,37 no eixo de H/H_0 , que corresponde ao T_0 . Ou seja, no ensaio onde foi introduzido o tarugo (*slugtest*) T_0 foi o tempo necessário para que o nível de água rebaixasse 73 % da variação total com relação ao nível estático, da mesma forma quando se retira o tarugo do poço (*bailtest*) T_0 foi o tempo necessário para que o nível de água recuperasse 73% da variação total, em ambos os casos no instante T_0 , o nível d'água estava a 37% das condições iniciais de teste.

3.7 Cálculo do influxo de água subterrânea na cava

A metodologia utilizada para estimativa do aporte de água subterrânea na cava foi proposta por Marinelli e Niccoli (2000), considera-se o fluxo hídrico através das estruturas hidrogeológicas expostas nos taludes (Zona 1) e no fundo da cava (Zona 2). O volume de água subterrânea que percola através das Zonas 1 e 2, foi calculado baseado nas equações 5, 6, 7 e 8.

$$h_0 = \sqrt{h_p^2 + \left(\frac{W}{K_{h1}} \left(\frac{r_0}{r_p} \right) - \frac{(r_0^2 - r_p^2)}{2} \right)} \quad (5)$$

$$Q_1 = W\pi (r_0^2 - r_p^2) \quad (6)$$

$$Q_2 = 4r_p \left(\frac{K_{h2}}{m_2} \right) (h_0 - d) \quad (7)$$

$$m_2 = \sqrt{\frac{K_{h2}}{K_{v2}}} \quad (8)$$

Onde:

h_0 é a espessura saturada inicial (pré-mineração) acima da base da Zona 1 (m)

h_p é a espessura saturada na parede da cava (m)

W é o fluxo de recarga (m/s)

K_{h1} é a condutividade hidráulica horizontal da Zona 1 (m/s)

K_{h2} é a condutividade hidráulica horizontal da Zona 2 (m/s)

K_{v2} é a condutividade hidráulica vertical da Zona 2 (m/s)

r_p é o raio efetivo da cava (m)

r_0 é o raio de influência, onde o rebaixamento é igual a zero (m)

d é a profundidade do lago da cava

m_2 é um parâmetro de anisotropia

Q_1 é o influxo pelas paredes da cava (Zona 1) (m³/s)

Q_2 é o influxo pelo fundo da cava (Zona 2) (m³/s)

Os parâmetros utilizados nas equações foram obtidos através dos ensaios e levantamentos realizados, e evidências encontradas em campo. Tendo em vista que a cava interfere apenas em um aquífero e as estruturas hidrogeológicas das Zonas 1 e 2, são as mesmas, foi considerado o mesmo valor para K_{h1} e K_{h2} , determinado com o ensaio de *Slugtest*. Adotou-se um valor de anisotropia igual a 0,1, conforme proposto por Todd (1980), dessa forma através do valor encontrado para K_{h2} , obtém-se um valor 10 vezes menor para K_{v2} .

Baseado no conceito definido por Brasil (2012), a cota da nascente localizada dentro da área da cava foi utilizada para determinação de “ h_0 ”, que é diferença entre o nível de água natural do aquífero antes da mineração e a cota do nível d’água sobre o limite inferior da Zona 1, uma vez que se assumiu a existência de um lago permanente que não pode ser bombeado no interior da cava.

Os parâmetros “ d ” e “ h_p ” correspondem à profundidade do lago nas condições iniciais para o cálculo.

O raio efetivo da cava (r_p) foi calculado através da fórmula da área da base do cone (Equação 9), utilizou-se a área da cota média da cava obtida no ArcGis® para realização do cálculo.

$$A = \pi r^2 \tag{9}$$

Onde:

A é a área da base do cone (m²)

r é o raio da base (m)

$\pi = 3,14$

3.8 Balanço hídrico no enchimento da cava

A análise de enchimento da cava e formação do lago foi baseada no influxo líquido cumulativo de água para a cava ao longo do tempo até que o nível d'água atingisse a cota máxima de extravasão. Os componentes primários considerados no balanço hídrico incluíram precipitação, escoamento superficial, influxo de águas subterrâneas e evaporação direta na superfície do lago, a evapotranspiração na área de drenagem não foi levada em conta visto que esse valor já é descontado na taxa de recarga que influencia diretamente na contribuição da água subterrânea.

Para avaliação da recuperação nível freático e enchimento da cava, foi elaborado um balanço hídrico simplificado com base na lei da conservação de massa, a partir da equação do balanço hídrico (Equação 10), conforme proposto por Lima (2008).

$$I+O= \Delta S \quad (10)$$

Onde:

I são os fluxos positivos (entrada de água)

O são os fluxos negativos (saída de água)

ΔS é a variação no armazenamento

A precipitação direta na área do lago, o escoamento superficial e o influxo de água subterrânea, foram os componentes considerados como fluxo positivo, e a evaporação na área da cava aplicada a área superficial do lago considerada como fluxos negativos.

Considerando os dados climáticos e fatores locais, o mês de setembro foi escolhido como referência para menor cota da lâmina d'água, portanto os cálculos do enchimento se iniciam no mês de outubro.

3.9 Elaboração do modelo

O modelo foi criado com base nas soluções matemáticas propostas por Marinelli e Niccoli (2000), e na equação do balanço hídrico, que é a própria lei da conservação de massa. Sob a ótica de Feitosa *et al.*, (2008), os modelos analíticos utilizam soluções matemáticas deduzidas para situações simplificadas, e podem ser elaborados com um conhecimento de matemática e uma ferramenta para calcular. Diante disso, utilizou-se o Excel®, para relacionar todas as variáveis de entrada do modelo e realizar as operações matemáticas das equações 5,6,7, 8 e 10.

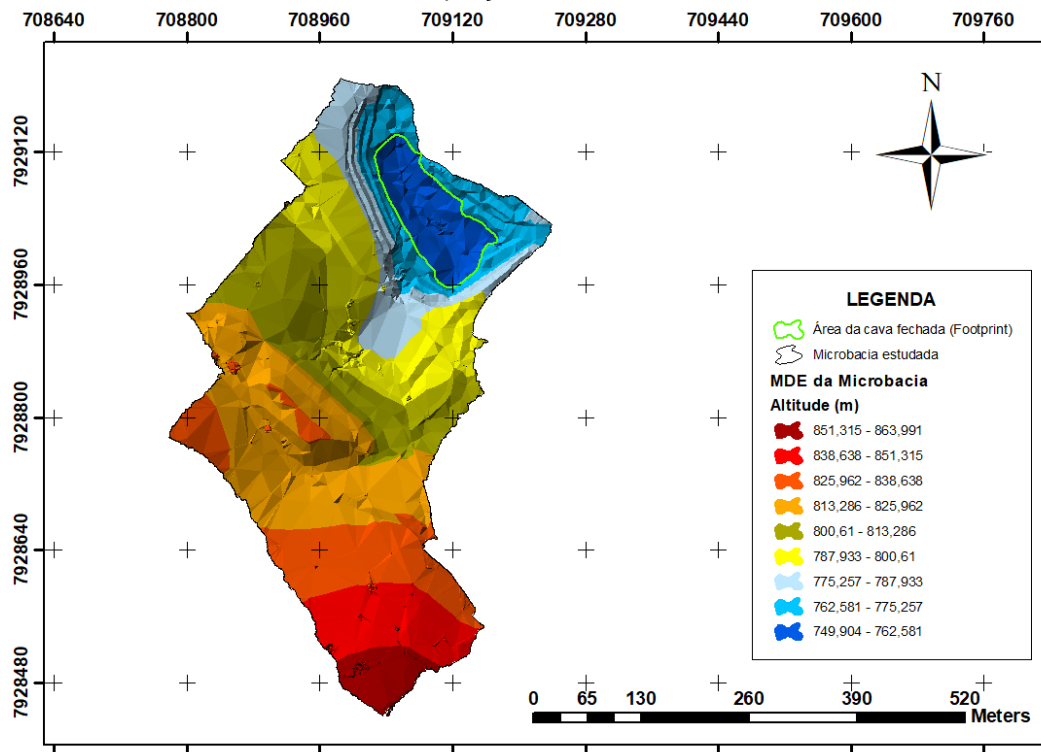
A calibração do modelo foi feita com base no tempo de enchimento real da cava, considerando que a menor cota da lâmina d'água no interior cava foi registrada no final do mês de setembro de 2019 e que o lago atingiu a cota de extravasão no final do mês de março de 2020, foi necessário aproximadamente 6 meses para enchimento da cava até a cota máxima.

A análise do impacto hidrológico e hidrogeológico inerente à cava foi feita através da delimitação do raio de influência em um cenário de rebaixamento do nível d'água e por meio da avaliação do comportamento das componentes do balanço hídrico em um período de 5 anos, a contar desde o início do enchimento da cava. Foram identificadas as principais fontes de entrada de água, o comportamento delas durante o período de análise, assim como a vazão média de extravasão após o enchimento completo da cava.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A estatística do MDE determinou as características topográficas gerais da microbacia de estudo, que apresenta um relevo ondulado com variação de altitude entre 863,99 m e 749,90 m, apresentando uma diferença de nível de 114,09 m, e uma cota altimétrica média de 806,63 m. A microbacia possui área de 17,90 ha (Figura 9), apresenta uma drenagem central que converge para dentro da cava, não possui afloramentos rochosos que possam desviar o escoamento natural da água, isso acontece de forma pontual devido uma pilha de estéril localizada na região central da área. A maior exposição ao sol ocorre no período da manhã.

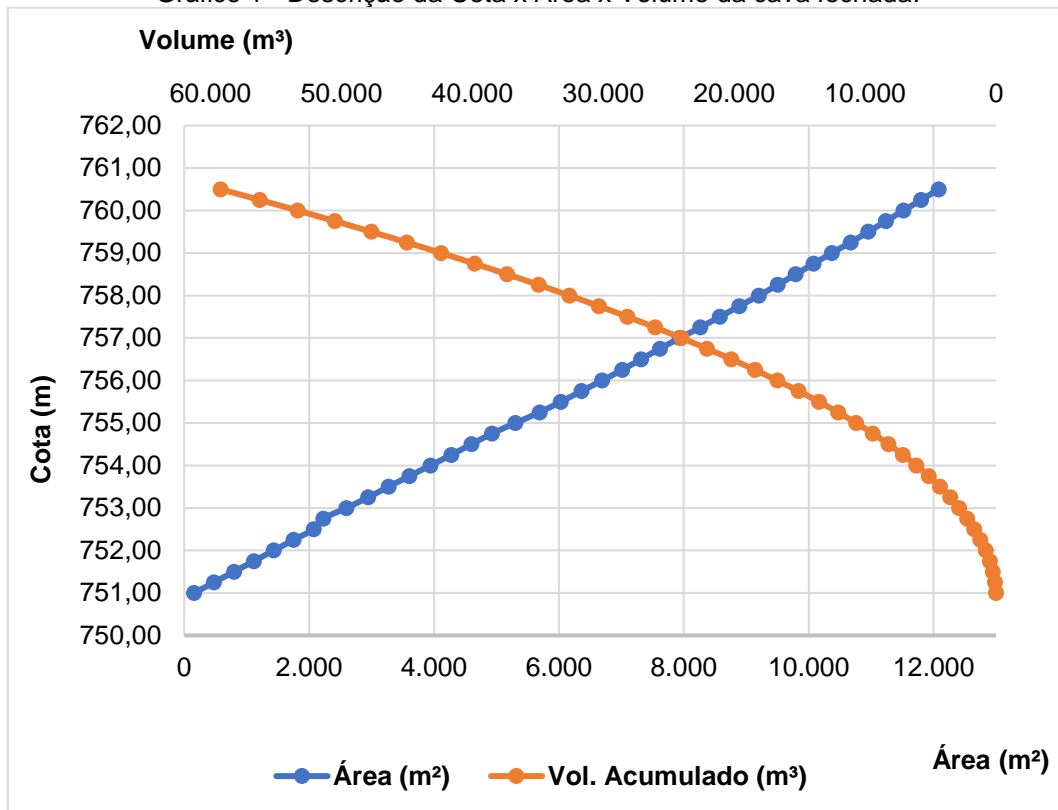
Figura 11 - Modelo digital de elevação (MDE) da microbacia estudada, com destaque para a localização da cava, na porção norte da microbacia.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A profundidade da cava fechada, até o seu limite máximo para a extravasão é de 9,50 m, compreendida entre as cotas 751,00 m a 760,50 m, sendo a menor estimada de acordo com a profundidade do lago. O detalhamento topográfico da cava foi descrito através das curvas Cota x Área e Cota x Volume (Gráfico 1).

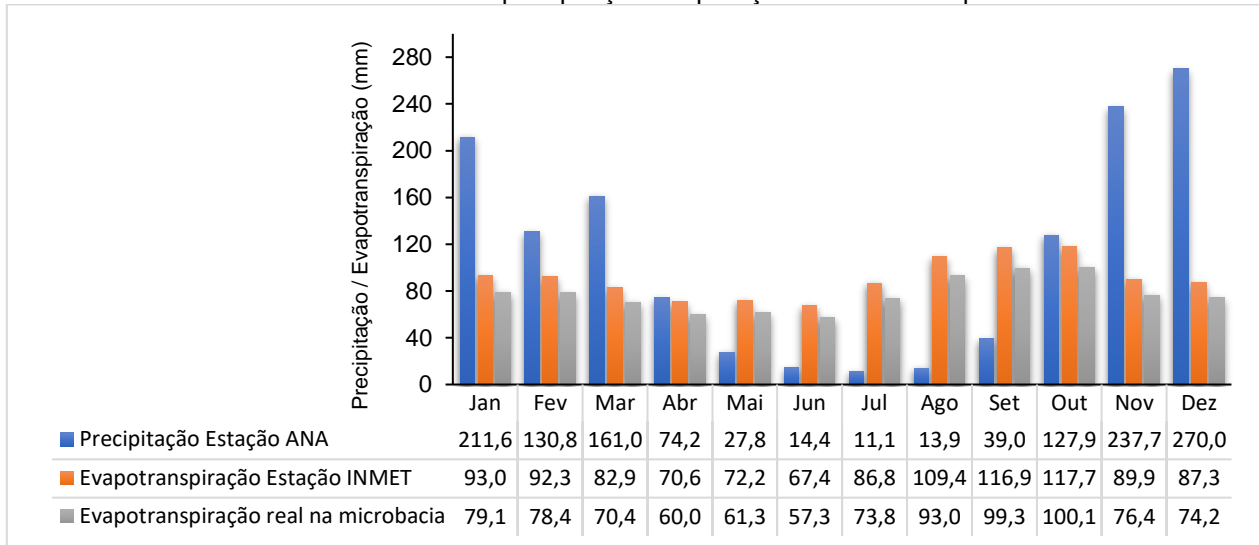
Gráfico 1 - Descrição da Cota x Área x Volume da cava fechada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Os dados climatológicos obtidos através de médias mensais de séries históricas de estações pluviométricas e meteorológicas localizadas em áreas que possuem clima semelhante à área de estudo, indicaram 1.319,40 mm de precipitação anual e 923,32 mm de evapotranspiração real por ano (Gráfico 2). A precipitação média para Sabinópolis proposta por Álvares *et al.* (2013), de 1.493 mm/ano, observa-se uma diferença de 173,6 mm, que pode ser justificada considerando que o autor trabalhou em uma escala menor, propondo uma classificação para todo o Brasil, o que acaba omitindo informações locais importantes, podendo maximizar resultados pontuais, além do período da série histórica utilizado, compreendido entre 1950 a 1990, considerando dados de 30 anos atrás. Em contra partida esse trabalho utilizou dados de uma estação pluviométrica à 10km de distância da área de estudo, e uma série histórica compreendida de 1968 a 2018, que já considera as variações climáticas mais recentes e possui representatividade local.

Gráfico 2 - Médias mensais de precipitação evaporação de referência para o estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Observa-se que o período com maior índice pluviométrico está compreendido entre os meses de outubro a março e o período seco de abril a setembro. A evapotranspiração real estimada representa 69,98% da precipitação anual, portanto, do volume total de chuva, apenas 30% aproximadamente é convertido em recarga de corpos hídricos subterrâneos e escoamento superficial.

A recarga estimada para a microbacia estudada foi 22,60 mm/ano, tendo em vista que a vazão medida da nascente foi 0,2822 m³/h e a área de drenagem que contribui para essa vazão é de 109.389,01 m².

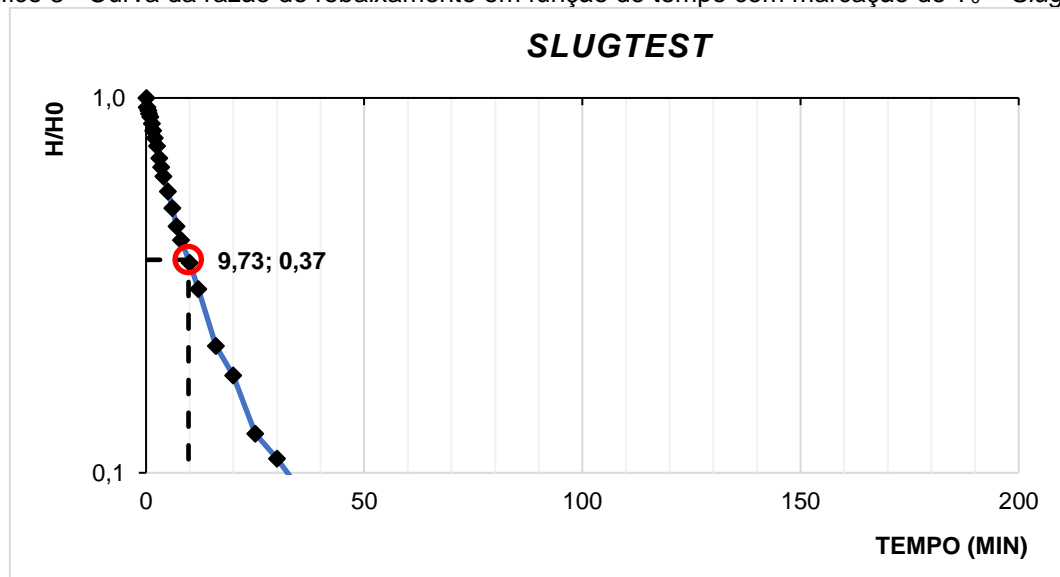
O volume de recarga obtido corresponde a 1,71% da precipitação anual na área de estudo, esse resultado indica que a contribuição das chuvas para o abastecimento dos corpos hídricos subterrâneos é extremamente baixa. Esse resultado é semelhante a taxa de recarga de 2,2% obtida por Mourão (2007), verificada em uma área com características de solo, cobertura vegetal e uso da terra semelhantes a área de estudo do presente trabalho. O autor utilizou o método de Rorabaugh para estimativa da recarga, que considera a premissa de que os ganhos e perdas de água são advindos apenas da recarga e subsequente descarga, e atribui uma relação de proporcionalidade aos baixos valores obtidos com a vazão específica da bacia e ao espaço de tempo de monitoramento, ou seja, bacias que apresentam baixa vazão específica e são monitoradas por pouco tempo tendem a apresentar taxas de recarga baixas. Essas

condições também se assemelham com as características e método utilizado nesse trabalho.

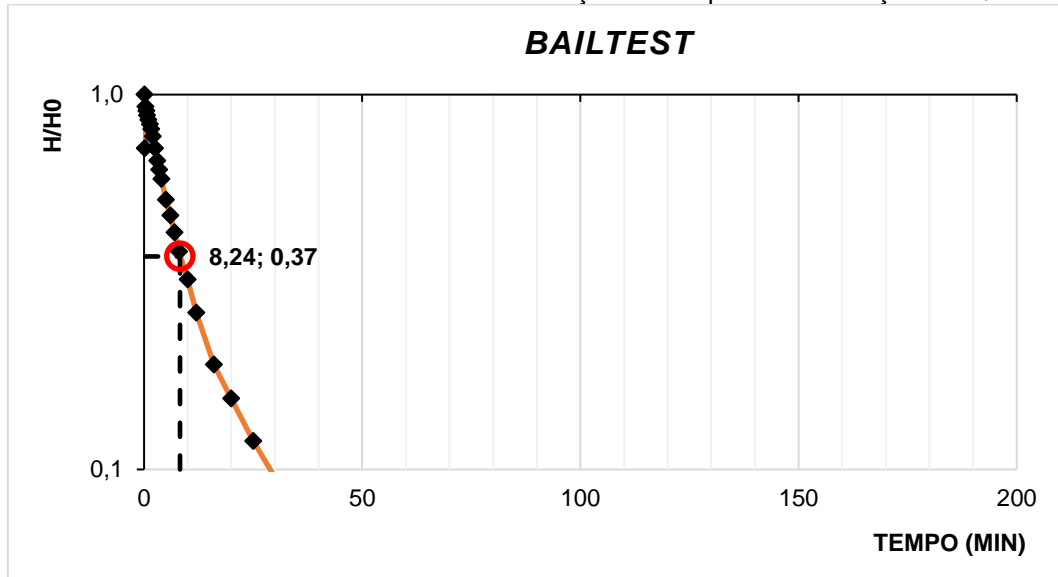
O coeficiente de escoamento superficial calculado para a área de estudo foi 0,26. O resultado mostra que cerca de 26 % do volume de precipitação incidente na microbacia escoou sobre a superfície em forma de deflúvio.

Os ensaios de *slugtest* e *bailtest* tiveram duração média de 3h e apresentaram variação de nível d'água de 0,55 m e 0,42 m, respectivamente, com relação ao nível estático medido no piezômetro. A razão de rebaixamento em função do tempo observadas durante a realização dos ensaios (Gráficos 3 e 4) mostram que 73% do rebaixamento/recuperação do nível d'água até a posição inicial (nível estático) acontece em menos de 10 min.

Gráfico 3 - Curva da razão de rebaixamento em função do tempo com marcação de T_0 – *SlugTest*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Gráfico 4 - Curva da razão de rebaixamento em função do tempo com marcação de T_0 – *Bailtest*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Os dados de cada ensaio foram interpretados separadamente (Tabela 1), e a média geométrica dos valores obtidos resultou em uma condutividade hidráulica (K) de $3,9 \times 10^{-8}$ m/s para litologia existente na área de estudo. Betim (2013) em um estudo sobre condutividade hidráulica dos solos da região de Viçosa/MG encontrou valores relativamente parecidos, com resultados com ordem de grandeza de 10^{-7} m/s e 10^{-8} m/s para Argissolos, Cambissolos e Latossolos.

Tabela 1 - Parâmetros de cálculo e valores de condutividade hidráulica obtidos pelo método de Hvorslev.

Parâmetros	SlugTest	BailTest
Nível estático (m)	10,30	10,30
Raio do piezômetro (m)	0,0127	0,0127
Raio do revestimento (m)	0,0127	0,0127
Comprimento do filtro (m)	30,00	30,00
Varição do NA (h_0) (m)	0,55	0,42
t_{37} (minutos)	9,73	8,24
Condutividade Hidráulica (m/s)	3,6E-08	4,2E-08

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Observa-se que as variáveis de entrada para cálculo do influxo de água subterrânea e balanço hídrico na área de estudo apresentam uma coerência na ordem de grandeza, visto que, se o coeficiente de escoamento superficial é baixo, as perdas de

água por recarga e evapotranspiração são grandes, a recarga na área de estudo é baixa e está diretamente ligada a condutividade hidráulica, entretanto a evapotranspiração é alta.

As variáveis utilizadas para estimativa do influxo de água subterrânea na cava (Tabela 2) foram definidas considerando a menor cota do lago permanente que existe na cava.

Tabela 2 - Inputs para cálculo de entrada de água subterrânea.

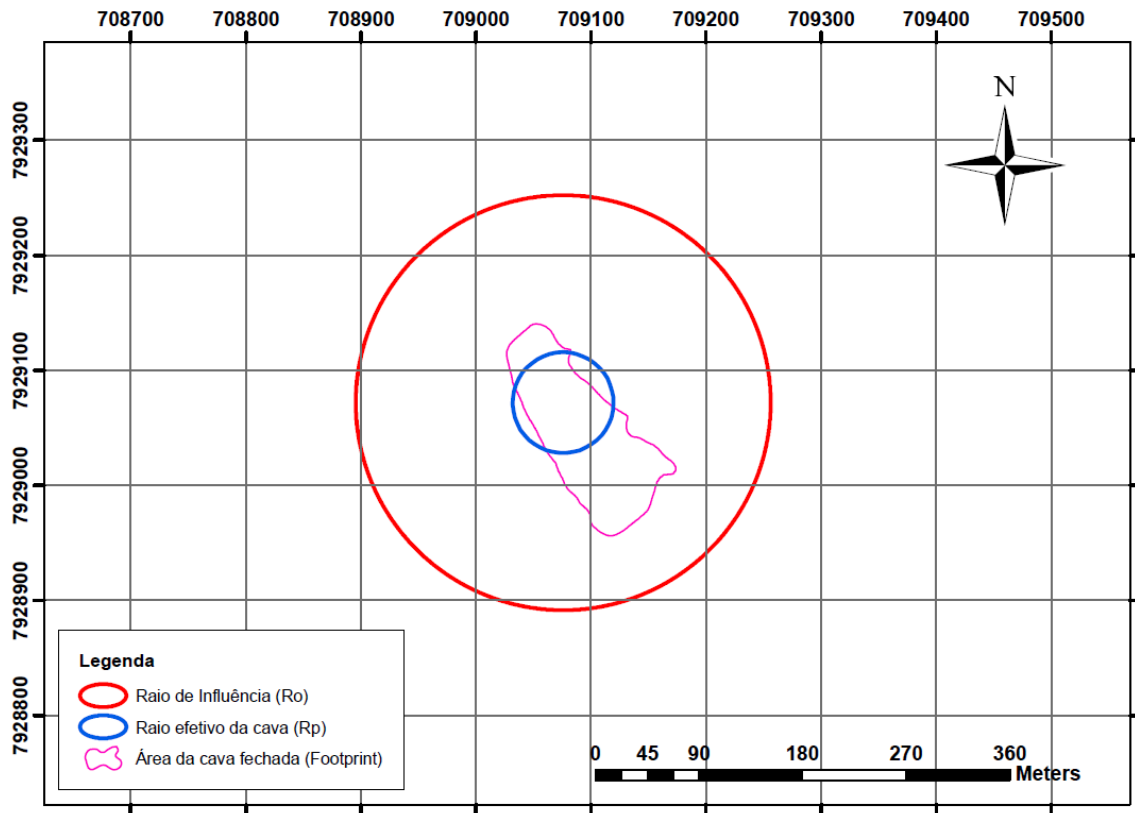
Variável	Valor	Unidade
Cota do nível d'água permanente na cava	751,75	m
Cota da nascente	775,50	m
Cota Média	755,50	m
Área da cava na cota média	6032,13	m ²
Raio efetivo da cava (r_p)	43,82	m
Espessura saturada inicial (h_0)	23,75	m
Recarga (W)	7,17E-10	m/s
Espessura Saturada na parede da cava (h_p)	0,75	m
Profundidade do lago (d)	0,75	m
Condutividade Hidráulica na Zona 1 (K_1)	3,9E-08	m/s
Condutividade Hidráulica na Zona 2 (K_2)	3,9E-08	m/s
Anisotropia em K_2 (K_{v2}/K_{h2})	0,10	-
K_{h2}	3,9E-08	m/s
K_{v2}	3,9E-09	m/s

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O raio de influência do rebaixamento do nível de água até a cota do lago é de 180,24 m (Figura 10), ou seja, em uma situação de desaguamento até a menor cota da lâmina d'água registrada na cava, a área que estiver dentro do raio de influência será afetada. Se for considerado cenário de operação da mina, onde fosse necessário o desaguamento total da cava, o raio de influência seria 184,10m.

O volume de entrada de água subterrânea total na cava é de 10,24 m³/dia, sendo que 5,95 m³/dia influi pelas estruturas laterais (Zona 1) e 4,30 m³/dia pelo fundo (Zona 2), esse volume corresponde à uma vazão de 0,43 m³/h.

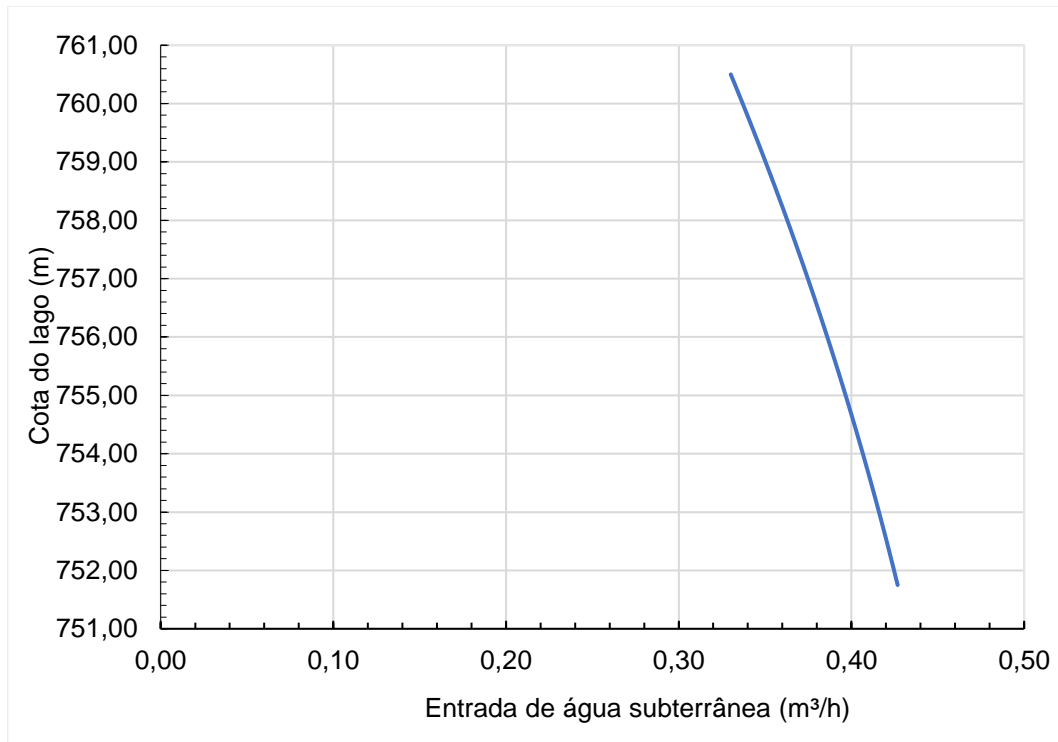
Figura 12 – Representação do raio de influência teórico em um cenário de rebaixamento do nível d'água.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O influxo de água subterrânea está diretamente ligado a profundidade do lago existente na cava, quanto maior a profundidade do lago menor é a vazão de entrada de água subterrânea, visto que o aumento da cota da lâmina d'água aumenta a espessura saturada das Zonas 1 e 2. Marinelli e Niccoli (2000) durante o desenvolvimento teórico de um trabalho para determinar equações analíticas para estimativa do fluxo de água subterrânea em uma mina, apontaram que o rebaixamento do lençol freático diminuiu a espessura saturada dos materiais rochosos e favoreceu a entrada de água, dessa forma entende-se que o contrário, dificulta a entrada de água na estrutura. No cenário estudado a vazão máxima de água subterrânea é $0,43 \text{ m}^3/\text{h}$ e a mínima é $0,33 \text{ m}^3/\text{h}$ (Gráfico 5).

Gráfico 5 - Relação entre a vazão de entrada de água subterrânea na cava e a cota da lâmina d'água do lago.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O balanço hídrico para verificar o comportamento do enchimento da cava (Tabela 3) considerou três fluxos positivos (água subterrânea, escoamento superficial e precipitação direta) e um fluxo negativo (evaporação direta).

Tabela 3 - Vazões mensais consideradas no balanço hídrico do enchimento da cava em cada mês.

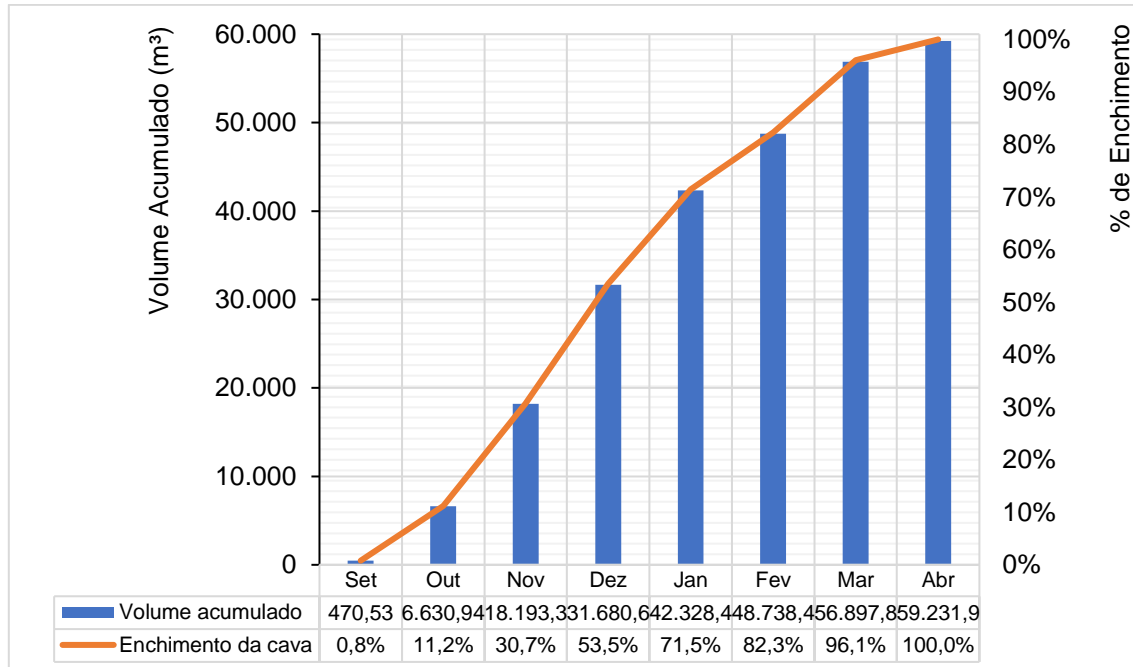
Mês	Área de Drenagem	Área do Lago	Escoamento Superficial	Água Subterrânea	Precipitação direta	Evaporação direta	Balanço Hídrico	Balanço Acumulado	Vazão de Extravasão	
	m ²	m ²	m ³ /mês	m ³ /mês	m ³ /mês	m ³ /mês	m ³ /mês	m ³	m ³ /mês	m ³ /h
Out	177.855	1.115	5.812	318	143	112	6.160,41	6.630,94	-	0,000
Nov	175.027	3.942	10.634	293	937	301	11.562,36	18.193,30	-	0,000
Dez	172.276	6.693	11.889	287	1.808	497	13.487,36	31.680,66	-	0,000
Jan	170.079	8.890	9.197	272	1.881	703	10.647,76	42.328,42	-	0,000
Fev	168.889	10.080	5.645	238	1.318	790	6.410,00	48.738,42	-	0,000
Mar	168.013	10.956	6.912	256	1.764	772	8.159,44	56.897,86	-	0,000
Abr	167.167	11.802	3.169	240	875	708	3.576,13	59.231,97	771,48	1,072

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Os resultados mostram que o enchimento até a cota de extravasão acontece em 6 meses e 20 dias, considerando o início do enchimento no mês de outubro. No mês de março a cava estava com 96,1% do volume total, e ao final de mês de abril já estava completamente cheia, entretanto o balanço hídrico (Tabela 06) mostra que houve uma extravasão de 771,48 m³. Considerando a diferença entre o volume máximo da cava, apresentado no balanço acumulado do mês de abril e o volume acumulado ao final de março, observa-se que falta 2.334,41m³ para o enchimento total, o balanço hídrico do mês de abril permite identificar uma vazão 119,20 m³/dia, portanto em aproximadamente 20 dias desse mês o volume máximo é atingido, e o restante verte sobre a cota de extravasão.

O avanço do enchimento com relação aos meses (Gráfico 6) indica um volume acumulado no mês de setembro, referente ao lago permanente, esse valor corresponde a menos de 1% do volume total da cava.

Gráfico 6 - Evolução do enchimento da cava para o período chuvoso, de setembro de 2019 a abril de 2020.

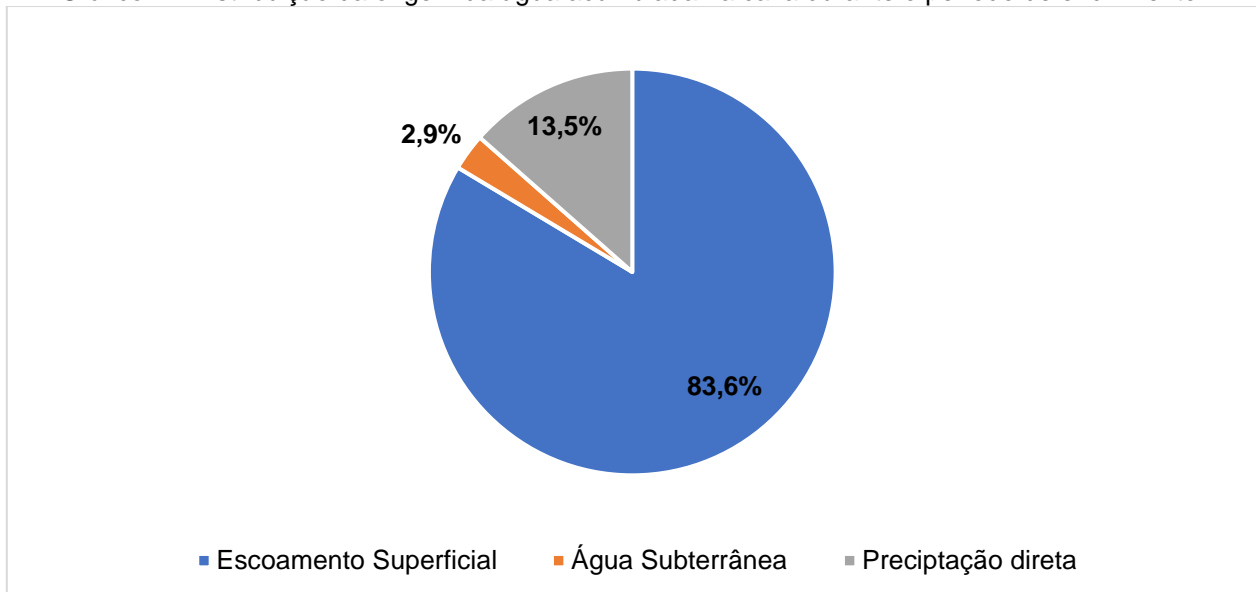


Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O balanço hídrico permite identificar a contribuição de cada fonte de água para o enchimento da cava (Gráfico 7). O escoamento superficial é responsável por 83,6% do

volume de água que acumula na cava, seguido da precipitação direta na superfície do lago e por último a água subterrânea.

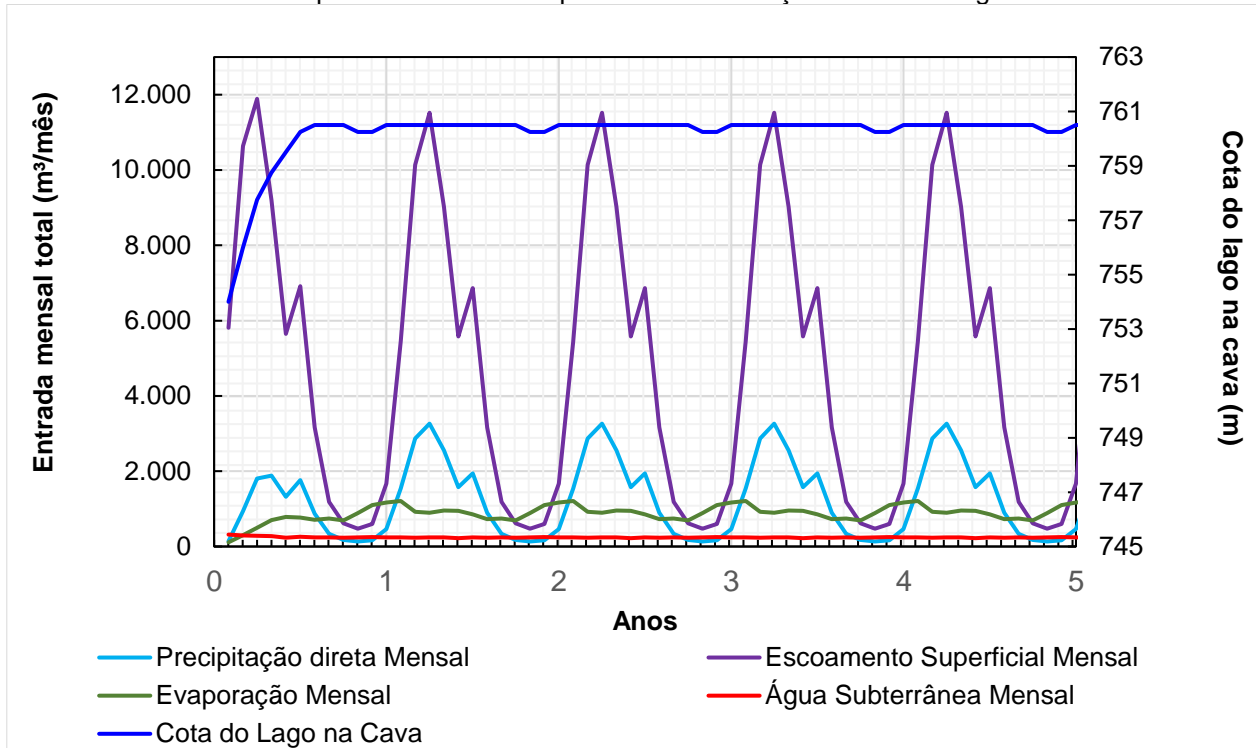
Gráfico 7 - Distribuição da origem da água acumulada na cava durante o período de enchimento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Assim como o influxo de água subterrânea, os demais componentes do balanço hídrico também variam à medida que a cota da lâmina d'água aumenta, isso implica em maior volume de precipitação e evaporação direta no lago e diminuição do volume de escoamento superficial, tendo em vista que a área de drenagem, é a diferença entre a área da bacia de contribuição da cava e a área da superfície do lago. Todavia, o comportamento das componentes do balanço hídrico durante um período de cinco anos (Gráfico 8), a contar no início do enchimento da cava, mostra que as variações da precipitação direta, evaporação direta e escoamento superficial estão diretamente ligados a sazonalidade climática da região, a formação do lago interfere de maneira insignificante nessas componentes.

Gráfico 8 - Comportamento das componentes do balanço hídrico ao longo de 5 anos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O escoamento superficial e a precipitação direta na superfície do lago são as principais fontes de entrada de água na cava, essas duas componentes estão ligadas ao volume mensal de chuva, portanto as séries do escoamento e precipitação direta, apresentam picos máximos em dezembro e mínimos em julho. O influxo de água subterrânea é extremamente baixo, se comparado às demais componentes entrada, a vazão de entrada se mantém praticamente constante ao longo dos anos, apresentando valores máximos durante o enchimento da cava, e depois oscilando de acordo com o número de dias de cada mês. A evaporação mensal é a única componente negativa considerada no balanço hídrico, observa-se que nos meses mais secos, julho e agosto, o volume de evaporação ultrapassa o somatório do escoamento superficial, precipitação direta e influxo subterrâneo, portanto o balanço nesses meses é negativo, em função disso ocorre uma diminuição da cota do lago, que é recuperada logo após no mês de setembro.

O balanço hídrico após o enchimento resulta em uma vazão mensal de entrada e de extravasão, que verte sobre a cota máxima da cava (Tabela 4).

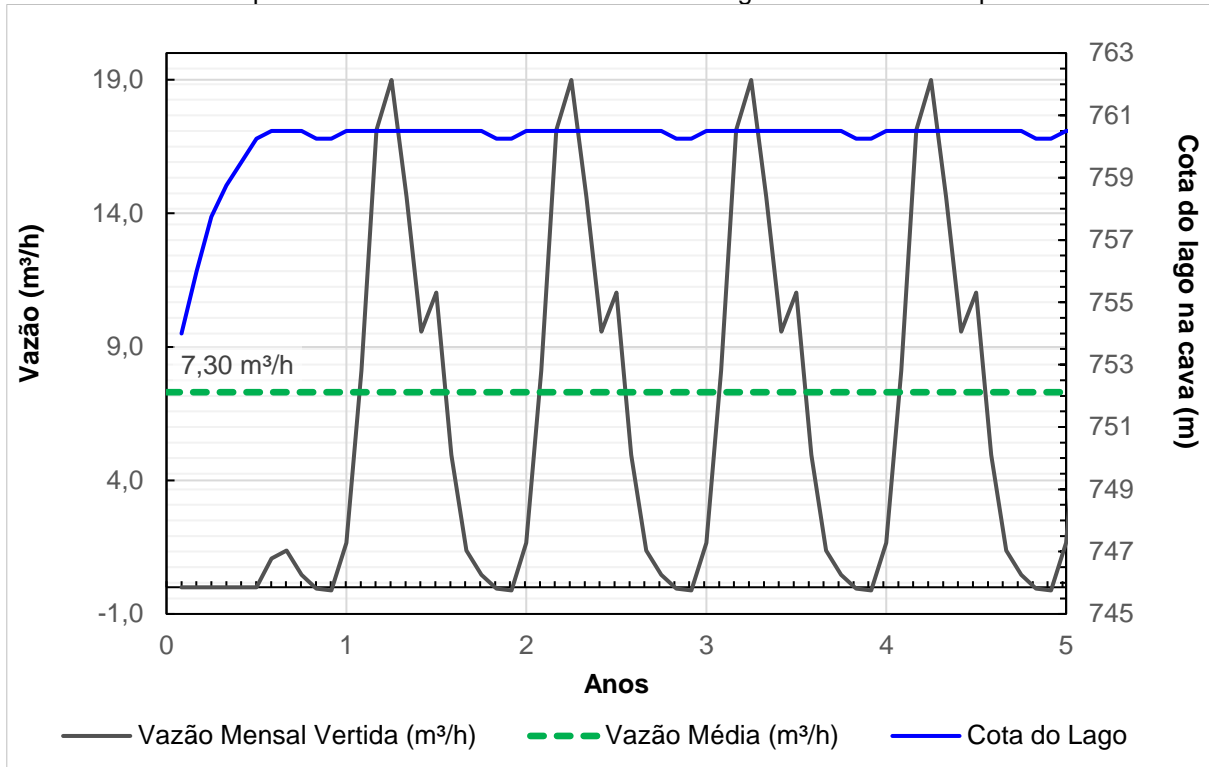
Tabela 4 – Vazões mensais de entrada e extravasão de água.

Vazão mensal do balanço hídrico (m³)		
Mês	Entrada	Extravasão
Outubro	6.035,18	6.035,18
Novembro	12.326,18	12.326,18
Dezembro	14.129,29	14.129,29
Janeiro	10.871,70	10.871,70
Fevereiro	6.432,26	6.432,26
Março	8.205,01	8.205,01
Abril	3.572,28	3.572,28
Maio	1.024,39	1.024,39
Junho	334,12	334,12
Julho	-39,19	0
Agosto	-88,96	0
Setembro	1.195,64	1.067,49

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A vazão de entrada nos meses de julho e agosto, período de seca severa, é negativa, portanto, não há vertimento nesses meses, a cava, na verdade, reduz o volume total de água. Ressalta-se que esse comportamento é pontual e limitado a meses sem contribuição significativa do escoamento superficial e precipitação direta na superfície do lago. O balanço hídrico mostra que 63.997,89 m³ de água extravasa por ano, isso corresponde a uma vazão média de 7,30 m³/h. O comportamento da vazão vertida na cava e a relação com a cota da superfície do lago em um período de cinco anos (Gráfico 9), a contar do início do enchimento, dessa forma nos primeiros 6 meses, período compreendido de outubro a março, nenhum volume de água extravasa pela cota máxima da cava, a partir de abril nota-se o início da extravasão. A curva da vazão mensal vertida, assemelha-se com a curva do escoamento superficial, o que ratifica influência da sazonalidade climática nas componentes do balanço hídrico e a origem da principal contribuição hídrica para cava.

Gráfico 9 - Comportamento da vazão de extravasão de água na cava em um período de 5 anos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A análise dos resultados do balanço hídrico no período de enchimento e ao longo de um período de 5 anos demonstra que a cava se comporta como um reservatório de água proveniente principalmente da chuva, que se acumula através da precipitação direta e escoamento superficial. Após o enchimento verificou-se uma vazão de extravasão média de 7,30 m³/h, o que permite a manutenção do volume total e a utilização da vazão excedente para usos múltiplos, como abastecimento de pequenos núcleos populacionais rurais, aspersão de estradas vicinais, vias de acesso e irrigação.

Diante disso, assumiu-se que a cava possui um impacto positivo com relação aos recursos hídricos, considerando o seu cenário atual.

5 CONCLUSÃO

A topografia da área de estudo apresenta feições de relevo onduladas, drenagem central, que direciona todo o escoamento superficial da microbacia para a cava, que pode acumular um volume máximo de 59.231,97m³.

A análise dos dados históricos de pluviometria e evapotranspiração foi de extrema importância, já que, através desses dados foi possível calcular o balanço hídrico da área de estudo, determinando o período de estiagem (abril a setembro) e de precipitação (outubro a março).

Os cálculos para a estimativa de recarga consideraram um aquífero em regime estacionário, e resultaram em um valor de 22,60 mm/ano, o que representa 1,71 % do volume de chuvas.

O coeficiente de escoamento superficial aponta que 26 % do que chove se transforma em deflúvio (escoamento superficial), o que corresponde 343,04mm/ano para a área de estudo.

O balanço hídrico do ano hidrológico apresentou um erro de 2,3%, considerando precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e recarga. Esse valor representa 30,44 mm, e considerando a utilização de dados secundários para determinação dos parâmetros hidrológicos, esse erro é aceitável.

Os ensaios *slugtest* e *bailtest* permitiram identificar que a litologia existente na microbacia de estudo apresenta baixa condutividade hidráulica ($3,9 \times 10^{-8}$ m/s), o que dificulta a percolação da água no meio subterrâneo.

Os cálculos de estimativa de influxo de água subterrânea na cava apresentaram uma vazão máxima de 0,43 m³/h, apontando a baixa representatividade da água subterrânea no processo de formação do lago.

O raio de influência do cone de rebaixamento do nível d'água atinge uma distância 180,24 m considerando a permanência de um lago de 0,75 m de profundidade, e 184,10 m em um cenário de desaguamento total da cava. Tendo em vista que uma pequena fração do curso d'água está dentro do raio de influência, por inferência pode-se dizer que em um cenário de rebaixamento do nível d'água, seja ele parcial ou total, haverá um impacto sobre o Ribeirão Graipu.

O balanço hídrico do enchimento da cava indicou a que a principal fonte de água é a chuva, visto que o volume acumulado é 83,6 % proveniente do escoamento superficial, 13,5% da precipitação direta na superfície do lago e apenas 2,9 % da água subterrânea.

O modelo analítico elaborado nesse estudo estimou o enchimento completo da cava em 6 meses e 20 dias, portanto as soluções matemáticas utilizadas possuem aderência às situações reais, visto que o tempo de enchimento da cava observado em campo foi de aproximadamente 6 meses.

O modelo analítico permitiu a análise do comportamento das componentes do balanço hídrico após o enchimento da cava, que apontou uma vazão média de extravasão 7,30 m³/h.

No que tange os recursos hídricos, a situação atual da cava assume um impacto positivo, considerando a capacidade de armazenamento de água proveniente da chuva, e que a vazão de vertimento pode ser utilizada para usos múltiplos mantendo a cota da lâmina d'água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, Danielle B. S. de. SILVA, Cícero L. da. OLIVEIRA, CARLOS A. DA S. **Influência da precipitação no escoamento superficial em uma microbacia hidrográfica do Distrito Federal.** Engenharia Agrícola, v. 26, n. 1, p. 103-112, 2006.

ALMEIDA, Andréia de. **Estudo experimental e de modelagem matemática do escoamento subterrâneo em uma vertente de zona ripária no bioma Cerrado.** Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM - 186/2016, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 164p. Brasília, DF. 2016.

ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ATAÍDE, Pedro. **Direito minerário.** Salvador: JusPodivm, 2017.

BARBOSA JÚNIOR, Antenor Rodrigues. Elementos de hidrologia aplicada. **Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Civil. Ouro Preto**, 2014.

BARONI, Magnos. **Comportamento geotécnico de argilas extremamente moles da baixada de Jacarepaguá.** Rio de Janeiro. UFRJ/COPPE, 2016.

BERTACHINI, Antônio Carlos; DE ALMEIDA, Danilo Carvalho de. **O rebaixamento do nível d'agua em mineração e obras civis.** **Águas Subterrâneas**, 2003.

BERTACHINI, Mauricio Nicolau. **Estudo de Recarga do Sistema Aquífero Cauê na Serra do Gandarela e na Mina de Capanema/MG – Vale.** Monografia de trabalho de formatura (TF – 2011 / 41). Universidade do Estado de São Paulo, USP. São Paulo. 2011.

BETIM, Luiza Silva. **Caracterização da condutividade hidráulica dos solos e estudo da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do Córrego Palmital–Viçosa/MG**. Viçosa, MG, 2013.

BOUWER, Herman, R. C. RICE. **A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells**. Water Resources Research. Washington (DC), n. 12, p. 423-28, 1976.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística. **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

CABRAL, Jaime J. Pereira da Silva; DEMÉTRIO, José Geilson Alves. **Aplicação de modelos em Hidrogeologia, em Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**, CPRM, Rio de Janeiro, p. 687–707. 2008.

CARVALHO, Ana Maciel de *et al.* **DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE UMA ÁREA CONTAMINADA DA GRANDE SÃO PAULO UTILIZANDO-SE MÉTODO *SLUG TEST***. Águas Subterrâneas, v. 27, n. 3, 2013.

CARVALHO, Ana Maciel de; HIRATA, Ricardo; SIMONATO, Mateus Delatim; ALBUQUERQUE FILHO, José Luiz. **MODELAGEM NUMÉRICA COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**. Águas Subterrâneas, 2018.

CARVALHO, Ana Maciel de. **Modelagem numérica como ferramenta para a gestão das águas subterrâneas em São José do Rio Preto-SP**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

CARVALHO, Daniel Fonseca de; SILVA, Leonardo Duarte Batista. **Hidrologia-Apostila**. Instituto de Tecnologia–UFRRJ, Rio de Janeiro, 2006.

CONCEIÇÃO, Leonardo Zauli; SANTOS, Rita de Cássia Pedrosa dos. **A Sustentabilidade e o Rebaixamento do Lençol Freático na Mineração**. Revista Pensar Engenharia, v.6, n.2, jul. 2018.

CORDEIRO, Iuri S. *et al.* **Mineração para Escolas: Ênfase na Cadeia Produtiva**. XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Belo Horizonte/MG. 2019.

CUNHA, Paulo César Ribeiro da; NASCIMENTO, Jorge Luiz do; SILVEIRA, Pedro Marques da; ALVES JÚNIOR, José. **Eficiência de métodos para o cálculo de coeficientes do tanque classe A na estimativa da evapotranspiração de referência**. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 43, n. 2, p. 114-122, 2013.

CONAMA, Resolução. **Nº 001, de 23 de janeiro de 1986**. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Publicado no DOU de v. 17, n. 02, 1986.

DINIZ, João Alberto Oliveira; MONTEIRO, Adson Brito; SILVA, Robson de Carlo da; DE PAULA, Thiago Luiz Feijó. **Manual de cartografia hidrogeológica**. - Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014.

DOMINGUES, Antônio Félix; BOSON, Patrícia Helena Gambogi; ALÍPAZ, Suzana (org.). Agência Nacional das Águas (ANA) e Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). (Brasil). **Gestão dos Recursos Hídricos e a Mineração**. 1ª. ed. Brasília, DF: [s.n.], 2006. 338 p. v. 1.

ECOPLAN-LUME, Consórcio. **Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce e planos de ações para as unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da bacia do rio Doce**. Volume I, Relatório Final, Minas Gerais. Ano, 2010.

ECOPLAN-LUME, Consórcio. **Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos Suaçuí - PARH Suaçuí**. Contrato nº 002/2007 - IGAM, Minas Gerais. 2010.

FARIAS, Carlos Eugênio Gomes. **Mineração e meio ambiente no Brasil. Relatório do CGEE/PNUD**, v. 76, p. 2, 2002.

FEITOSA, Fernando A. Carneiro; MANOEL FILHO, João; FEITOSA, Edilton Carneiro; DEMÉTRIO, José Geilson Alves (org. coord.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. CPRM, 2008.

FERREIRA, Adriana Niemeyer Pires; LIMA, Claudia Ferreira; CARDOSO, Fabrício B. da Fonseca; KETTELHUT, Júlio Thadeu (org.). **Águas Subterrâneas: um recurso a ser conhecido e protegido**. Secretária de Recursos Hídricos e Ambiente, 2007.

FERRAZ, Fernando de Medeiros; MIYASHIRO, Nilton Jorge; RIYIS, Marcos Tanaka; CUNHA, Rodrigo Cesar de Araújo. **Estudo da condutividade hidráulica obtida em ensaios de campo: infiltração em sondagens e slug test em poços de monitoramento**. InterfacEHS, v. 10, n. 1, 2015.

FERNANDES FILHO, Elpídio Inácio; SCHAEFER, Carlos Ernesto g. Reynaud (coord.). **Mapa de solos do estado de Minas Gerais: legenda expandida**. Universidade Federal De Viçosa/Fundação Centro Tecnológico De Minas Gerais/Universidade Federal De Lavras/Fundação Estadual Do Meio Ambiente. 2010.

FIORI, Joyce Pinheiro de Oliveira. **Avaliação de métodos de campo para a determinação de condutividade hidráulica em meios saturados e não saturados**. 2010.

FREITAS, Sérgio Martins de. **O impacto do uso e consumo de água na mineração sobre o bloco de energia assegurada em empreendimentos hidrogeradores:**

Estudo de caso da PCH Bicas. Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

GROSSI-SAD, J. H. 1997. **Geologia da Folha Guanhães.** In: GROSSI-SAD, J. H.; LOBATO, L. M.; PEDROSA-SOARES, A. C. & SOARES-FILHO, B. S. (coordenadores e editores). PROJETO ESPINHAÇO EM CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG – Companhia Mineradora de Minas Gerais. p. 2317-2435.

GROSSI SAD, J. H., CHIODI FILHO, C., SANTOS, J. F., MAGALHÃES, J. M. M. & CARELOS, P. M. (1990). **Dois suites graníticas do bordo sudeste do Craton São Francisco, em Minas Gerais: Petroquímica e Potencial Metalogenético.** Anais, 36o Cong. Bras. Geologia, Vol. 4, Natal, p. 1836-1841.

HIDROBR, Soluções Integradas. **ESTUDO DE ALTERNATIVAS PARA AUMENTO NA CAPACIDADE DE REGULARIZAÇÃO DE VAZÕES PARA O MUNICÍPIO DE GUANHÃES/MG.** Relatório Técnico. Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE). Guanhães, MG. 2018

HVORSLEV, Mikael Juul. **Time lag and soil permeability in ground-water observations.** Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, US Army, 1951.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Relatório Anual de Atividades Julho 2017-Junho 2018.** 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Setor mineral tem incremento positivo em quase todos os indicadores no 3º trimestre.** Portal da Mineração, Belo Horizonte, 20 de outubro de 2020. Disponível em: <http://portaldaminerao.com.br/ibram/setor-mineral-tem-incremento-positivo-em-quase-todos-os-indicadores-no-3o-trimestre/>. Acesso em: 11 de janeiro de 2021.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH**. Belo Horizonte. Minas Gerais. IGAM, 2010.

KNAUER, L. G. & GROSSI-SAD, J. H. 1997. **Geologia da Folha Serro**. In: GROSSI-SAD, J. H.; LOBATO, L. M.; PEDROSA-SOARES, A. C. & SOARES-FILHO, B. S. (coordenadores e editores). PROJETO ESPINHAÇO EM CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais. p. 2057-2316.

LIMA, Walter de Paula. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. Departamento de Ciências Florestais. Piracicaba, SP. 2ª Ed. 2008.

LORENZON, Alexandre Simões; DIAS, Herly Carlos Teixeira; TONELLO, Kelly Cristina. **Escoamento superficial da água da chuva em um fragmento florestal de Mata Atlântica, Viçosa-MG**. Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável, v. 5, n. 1, 2015.

MAGALHÃES, Lílian Rosa. **Contribuição para revisão do plano diretor de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas: o impacto da mineração do Alto Rio das Velhas**. 2010.

MALDANER, Carlos Henrique. **Recarga de aquífero em área urbana: estudo de caso de Urânia (SP)**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MARINELLI, Fred; NICCOLI, Walter L. **Simple analytical equations for estimating ground water inflow to a mine pit**. Groundwater, v. 38, n. 2, p. 311-314, 2000.

MARTINS, Fabrina Bolzan; GONZAGA, Gabriela; SANTOS, Diego Felipe dos; REBOITA, Michelle Simões. **Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 1, 2018.

MECHI, Andréa; SANCHES, Djalma Luiz. **Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo**. Estud. av. [online]. 2010, vol.24, n.68, pp.209-220. ISSN 0103-4014.

MOURÃO, Maria Antonieta Alcântara. **Caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. 2007. 297p.** 2007. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

OLIVA, Andresa; KIANG, Chang Hung; CAETANO-CHANG, Maria Rita. **Determinação da condutividade hidráulica da Formação Rio Claro: análise comparativa através de análise granulométrica e ensaios com permeâmetro *guelph* e testes de *slug***. Águas subterrâneas, v. 19, n. 2, 2005.

PAZ, Adriano Rolim da. **Hidrologia aplicada**. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – Unidade Caxias do Sul. 2004.

PINTO, Eber José de Andrade *et al.* **Estimativa da recarga natural do aquífero livre de uma sub-bacia da bacia representativa de Juatuba (MG) aplicando o método da variação dos níveis d'água (VNA)**. Águas Subterrâneas, 2010.

PINHEIRO, Rinaldo JB; NUMMER, Andrea Valli; RAUBER, Ana Carla. **DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DAS PRINCIPAIS UNIDADES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS DE SANTA MARIA-RS**. Geociências (São Paulo), v. 36, n. 2, p. 347-363, 2017.

PINTO-COELHO, Ricardo Motta; HAVENS, Karl. **Crise nas águas: educação, ciência e governança, juntas, evitando conflitos gerados por escassez e perda da qualidade das águas**. Belo Horizonte: Recóleo, 2015.

PONTES, Júlio César de; FARIAS, Maria Sallydelândia Sobral de e LIMA; Vera Lúcia Antunes de. **Mineração e seus reflexos socioambientais: Estudo de Impactos de vizinhança (EIV) causados pelo desmonte de rochas com uso de explosivos.** *POLÊM! CA*, v. 12, n. 1, p. 77-90, 2013.

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D. **Escoamento superficial.** Viçosa: UFV, 2003.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.

SILVA, José Ângelo Ferreira da. **Estimativa de recarga e caracterização hidroquímica e isotópica das águas subterrâneas dos aquíferos da região do canal do Jurubatuba.** 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SILVA, Elaine Lima da. **Determinação da condutividade hidráulica através do método de HAZEN no campus da UFRRJ.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2008.

SILVA, Vitor Heringer. **Estimativas do escoamento superficial em microbacia hidrográfica sob diferentes condições de uso da terra.** Monografia. Universidade Federal do Espírito Santo - UFES. Espírito Santo, 2014.

TODD, David Keith. 1980. **Groundwater Hydrology**, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 535p.

TUCCI, Carlos EM. **Coefficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas.** *Revista Brasileira de recursos hídricos*, v. 5, n. 1, p. 61-68, 2000.

VIVIANI-LIMA, Juliana Baitz. **Estimativa de recarga em áreas urbanizadas: estudo de caso na bacia do Alto Tietê (SP).** 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.