

Mestrado Profissional

Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais

**BALANÇO HÍDRICO E USO SUSTENTÁVEL DA ÁGUA NA MINA
DO SOSSEGO, CANAÃ DOS CARAJÁS – PA**

FRANCINALDO FERREIRA DO REGO SINDEAUX

Belém/PA

2019

FRANCINALDO FERREIRA DO REGO SINDEAUX

**BALANÇO HÍDRICO E USO SUSTENTÁVEL DA ÁGUA NA MINA
DO SOSSEGO, CANAÃ DOS CARAJÁS – PA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais, área de Ciências Ambientais, do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV).

Orientador: Roberto Dall’Agnol, Dr.

Co-orientador: Renato O. da Silva Júnior, Dr.

Belém/PA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S616

Sindeaux, Francinaldo Ferreira do Rego

Balanço hídrico e uso sustentável da água na mina do sossego, Canaã dos Carajás – PA -- Belém, 2019.

48 f.: il.

Dissertação (mestrado) -- Instituto Tecnológico Vale, 2019.

Orientador: Roberto Dall’Agnol, Dr.

Co-orientador: Renato Oliveira Silva Júnior, Dr.

1. Qualidade da água – Sossego, Mina do (PA). 2. Balanço hídrico – Sossego, Mina do (PA). 3. Água - Avaliação. 4. Mina do Sossego – Canaã dos Carajás (PA). I. Dall’Agnol, Roberto. II. Silva Júnior, Renato Oliveira. III. Título.

CDD 23. ed. 628.16098115

Bibliotecária responsável: Nisa Gonçalves - CRB 2 - 525

FRANCINALDO FERREIRA DO REGO SINDEAUX

**BALANÇO HÍDRICO E USO SUSTENTÁVEL DA ÁGUA NA MINA
DO SOSSEGO, CANAÃ DOS CARAJÁS – PA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais, área de Ciências Ambientais, do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV).

Data da aprovação:

Banca examinadora:

Dr. Roberto Dall’Agnol
Orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dr. Paulo Rógenes Pontes
Membro interno – Instituto Tecnológico da Vale (ITV)

Dra. Alexandra Lima Tavares
Membro interno - Instituto Tecnológico da Vale (ITV)

Dedico este trabalho a todos meus familiares,
principalmente a minha esposa e meus filhos,
que sempre acreditaram e participaram
juntos dessa realização.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos docentes, colegas e funcionários que fazem parte do Instituto Tecnológico Vale, principalmente ao professor Roberto Dall’Agnol, por todo apoio e orientação necessários para realização desse estudo.

Agradeço à empresa Vale, que me propiciou a oportunidade de desenvolver este estudo e contribuir com o objetivo da empresa de se tornar cada vez mais sustentável; agradeço a todos colegas da mina do Sossego em Canaã dos Carajás-PA, com destaque para a equipe de geotecnia, Dfferson Oliveira, Isidoro Costa, Jakeliny Moraes e, em especial, a minha gestora imediata, Maria Lucia de Oliveira, que sempre apoiou e contribuiu significativamente para este trabalho.

Agradeço a Deus e a minha esposa, Hisabelita Sindeaux, e a meus filhos, João Gabriel Sindeaux, João Miguel Sindeaux e Maria Clarisse Sindeaux, que sempre confiaram em mim e foram fundamentais por fornecerem incentivo e motivação para eu poder realizar este estudo.

Agradeço a todos meus demais familiares, principalmente a meu pai, Francisco Sindeaux, e minha mãe, Josefa Sindeaux, que sempre acreditaram e participaram juntos dessa realização.

RESUMO

A extração de minério de cobre em Canaã dos Carajás ocorre desde 2004 pela empresa Vale, em sua unidade operacional denominada Mina do Sossego. Para beneficiamento do minério sulfetado, presente em rocha dura, se utiliza um moinho tipo semiautógeno e grande volume de água. A água para este processo é armazenada em um reservatório tipo barragem, que também é utilizado para lançamento do rejeito da usina de beneficiamento. Tem-se verificado escassez de água no período de estiagem dos rios no entorno de Canaã dos Carajás, inclusive no rio Parauapebas - PA, principal curso d'água local, colocando em risco o suprimento de água para as atividades da mina. Esta tendência se acentuou nos dois últimos anos (2017 e 2018) de tal modo comprometendo a disponibilidade hídrica, especialmente no período de estiagem. Neste contexto, é recomendável fazer um balanço hídrico mensal do reservatório para calcular os volumes de águas que entram e saem do sistema e verificar quais variáveis exercem maior influência. O cálculo do balanço hídrico mostrou que durante o período chuvoso as variáveis de entrada se sobrepõem as variáveis de saída resultando em um balanço hídrico positivo, porém no período de estiagem o balanço hídrico é negativo.

Palavras-chave: Barragem de rejeitos. Balanço hídrico. Água. Sustentabilidade hídrica.

ABSTRACT

The extraction of copper ore in Canaã dos Carajás takes place since 2004 by Vale, in its operating unit called Mina do Sossego. A semi-autogenous mill with a large volume of water is used to treat the sulphide ore present in hard rock. The water for this process is stored in a dam-type reservoir, which is also used to discharge tailings from the beneficiation plant. Water shortages have occurred during the dry season of the rivers surrounding Canaã dos Carajás, including the Parauapebas River - PA, the main local sub-basin, putting the water supply to the mine's activities at risk. This trend has intensified over the last two years, creating an unprecedented water crisis. In this context, it is recommended to make a monthly water balance of the reservoir to calculate the volumes of water entering the system and the volume of the exits that are the water losses of the reservoir. The calculation of water balance showed that during the rainy season the input variables overlap the output variables resulting in a positive water balance, but in the dry season the water balance is negative.

Keywords: Tailings dam. Hydric balance. Water. Water sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Mapa de localização da mina do Sossego: a) Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI) no Brasil; b) Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas no estado do Pará; c) Localização da mina do Sossego na região de Carajás no sudeste do Pará. FLONACA = Floresta Nacional de Carajás.....	18
Figura 2	Disposição das principais estruturas que compõem a mina do Sossego, dentre elas estão a barragem, as pilhas de estéril, as cavas, escritórios administrativos e usina de beneficiamento; já no entorno estão a ferrovia do S11D e o rio Parauapebas.....	21
Figura 3	Representação esquemática dos componentes estruturais da barragem de rejeitos do Sossego, incluindo as principais entradas e saídas de água do reservatório.....	22
Figura 4	Seção transversal esquemática da barragem do Sossego.....	22
Figura 5	Pluviometria anual (em mm) na região da mina de Sossego.....	27
Figura 6	Pluviometria mensal, no período de 2004 a 2018 na região da mina do Sossego.....	28
Figura 7	Volume de água bombeada da cava do Siqueirinho nos anos de 2015 a 2017.....	29
Figura 8	Volumes mensais de água bombeada da cava do Setor Pista nos anos de 2016 a 2018.....	30
Figura 9	Volumes mensais de água bombeados da cava do Sossego nos anos de 2015 a 2018.....	30
Figura 10	Volume mensal de água (em milhões de m ³) da usina lançada na barragem de 2015 até 2018.....	32
Figura 11	Comparativo entre os dados de evapotranspiração da estação meteorológica do Sossego, nos anos de 2017 e 2018, com os dados de evaporação calculados pelos métodos Linacre (1993) e Kohler (1995).....	35
Figura 12	Comparativo entre os dados de volume (m ³ x 1000) mensal evaporado do lago da barragem do Sossego versus Área do Lago (m ² x 1000) nos anos de 2017 e 2018.....	36
Figura 13	Vazão de água (em m ³ /h) na saída do dreno de fundo da barragem do Sossego, medida na calha Parshall.....	38
Figura 14	Volume total (em m ³ x 10000) de água que percola durante cada mês pelo dreno de fundo da barragem, no período de 2017 e 2018.....	38
Figura 15	Volume mensal total de água (em m ³) que foi bombeado da barragem para uso no beneficiamento do minério na usina do Sossego nos anos de 2017 e 2018.....	39
Figura 16	Variações do volume de entrada de água (em milhões de m ³) oriunda de diferentes fontes no reservatório nos anos de 2017 e 2018.....	41
Figura 17	Variáveis de saída de água (em milhões de m ³) do reservatório nos anos de 2017 e 2018.....	42

Figura 18	Balanço hídrico da barragem do Sossego no ano de 2017.....	43
Figura 19	Balanço hídrico da barragem do Sossego no ano de 2018.....	43
Figura 20	Registro fotográfico do lago principal da barragem datado de 11/07/2017.....	44
Figura 21	Registro fotográfico do lago principal da barragem datado de 11/08/2017.....	44
Figura 22	Balanço Hídrico Calculado ($\text{m}^3 \times 10000$) da barragem do Sossego nos anos de 2017 e 2018 e Balanço Hídrico Ajustado com a Batimetria para os anos de 2017 e 2018.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Variáveis de entrada de água no reservatório e variáveis de saídas de água do reservatório, período dos dados e modo de medição ou calculado.....	19
Tabela 2	Data de realização das batimetrias, Área do lago (km ²), Área de drenagem (km ²) e Volume água medido no reservatório (m ³ x 10000).....	26
Tabela 3	Precipitação mensal (em mm) registrada na estação meteorológica do Sossego no período de 2004 e 2018.....	27
Tabela 4	Volume de água (em m ³) bombeado do rio Parauapebas de 2015 até 2018.....	33
Tabela 5	Volumes de precipitação direta e vazão afluyente nos anos de 2017 e 2018.....	40

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional da Água

ATO – Anotação Técnica da Obra

BHRI – Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas

Eq. – Equação

ETA – Estação de Tratamento de Água

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

FLONACA – Floresta Nacional de Carajás

IBRAM

SAG – Semi Autógeno

PA – Pará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	JUSTIFICATIVA.....	15
3	OBJETIVOS.....	17
3.1	OBJETIVO GERAL.....	17
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
4.1	ÁREA DE ESTUDO.....	18
4.2	DADOS CLIMATOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS.....	19
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM DA MINA DO SOSSEGO.....	20
4.4	METODOLOGIA.....	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	26
5.1	VARIÁVEIS DE ENTRADA DE ÁGUA NO RESERVATÓRIO.....	26
5.1.1	Precipitação.....	26
5.1.2	Água bombeada da cava Sequeirinho, setor Pista e cava Sossego.....	28
5.1.3	Água da usina lançada na barragem.....	31
5.1.4	Água bombeada do rio Parauapebas.....	32
5.1.5	Vazão Afluenta.....	33
5.2	VARIÁVEIS DE SAÍDA DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO.....	34
5.2.1	Evaporação.....	34
5.2.2	Infiltração.....	36
5.2.3	Percolação pelo dreno de fundo da barragem.....	37
5.2.4	Água bombeada da barragem para uso no beneficiamento do minério na usina.....	38
5.2.5	Água de vertimento.....	39
5.3	BALANÇO HÍDRICO.....	39
6	CONCLUSÃO.....	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A água está presente em quase todas as etapas da engenharia mineral e pode participar desde a extração e moagem do minério até sua concentração e geração de rejeitos (CIMINELLI *et al*, 2006; MPF, 2007). É utilizado um alto volume de água no transporte e disposição de rejeitos em barragens, sendo que de acordo com IBRAM (2016) apenas 10 a 25% dos constituintes dos rejeitos são sólidos. Atualmente, a maioria das mineradoras brasileiras utiliza barragens de contenção de rejeito para controle ambiental e acúmulo de água. Outra questão muito presente na mineração e plantas industriais de modo geral é o uso e reuso da água e a disponibilização final da água residual.

A mina do Sossego, localizada no município de Canaã dos Carajás, no sudeste do Pará, foi a primeira unidade de extração de cobre da empresa Vale S. A. Suas operações foram iniciadas em 2004, com capacidade de produção de 460 mil toneladas de concentrado de cobre por ano, com 30% de cobre contido (NANKRAN *et al.*, 2007). O método de extração e beneficiamento passa pela fragmentação, moagem, classificação e concentração. Nessas fases são gerados grandes volumes de rejeitos, que são depositados em uma barragem construída para retenção dos rejeitos e, também, como reservatório de onde é retirada a água utilizada no processo (PASSOS, 2009). Portanto, a barragem é a fonte essencial de água para o beneficiamento do minério na usina do Sossego.

Por outro lado, a região de Carajás apresenta duas estações climáticas bem definidas, com um período chuvoso se estendendo de outubro a maio e um período de precipitação muito baixa de junho a setembro (MORAES *et al.*, 2005; SILVA JÚNIOR *et al.*, 2017, durante o qual boa parte das drenagens do alto Parauapebas e inclusive seu leito principal podem secar e assumir caráter intermitente. Em anos de baixa precipitação, em particular no período de estiagem do rio Parauapebas, a contribuição da barragem do Sossego é de vital importância para o empreendimento. Neste contexto, torna-se indispensável efetuar o balanço hídrico da mina do Sossego, como forma de minimizar os riscos de uma escassez hídrica afetar o funcionamento das operações.

Diante disso, o presente trabalho apresenta o estudo de balanço hídrico aplicado à barragem da mina do Sossego, buscando indicar alternativas sustentáveis de reuso de água e viabilizar a recirculação da água em todo o processo de beneficiamento.

2 JUSTIFICATIVA

O volume de água do reservatório da barragem de rejeitos da mina do Sossego foi desde o início da atividade da mina suficiente para atender as demandas da usina de beneficiamento e garantir o programa de produção anual de concentrado de cobre. Porém, a partir de 2014, os índices de precipitação pluviométrica na região do Sossego ficaram abaixo de 1.200 mm/ano na área de entorno da mina, conforme dados da estação meteorológica do Sossego, colocando em risco o funcionamento da usina. Com a diminuição da precipitação contribuiu significativamente para aumentar a evaporação do lago. Durante os anos de 2015 a 2017, a barragem do Sossego perdeu até 99,47% de seu volume de água, conforme análise de dados das batimetrias anuais.

Como a escassez de água na barragem pode ocasionar a paralisação das operações de beneficiamento de minério de cobre na mina do Sossego, a disponibilidade de água passou a assumir um caráter estratégico para continuidade da produção. Isto é ainda mais acentuado pela perspectiva de que diversos depósitos localizados nas proximidades da mina do Sossego (p. ex.: Cristalino, Bacaba, Serra Dourada, Estrela) certamente serão convertidos em curto a médio prazo em novas minas, os quais terão seus minérios beneficiados na usina do Sossego e utilizarão do mesmo reservatório para acúmulo de água e disposição de rejeitos. Portanto, estudos e medidas que evitem ou reduzam substancialmente o risco de crise de abastecimento de água na mina eram fundamentais e precisavam ser realizados com urgência.

Neste contexto, para entender as causas do decréscimo de volume útil de água do reservatório da barragem se faz necessário conhecer com rigor as variáveis determinantes no balanço hídrico da barragem. Além da definição do balanço hídrico da mina, também é indispensável aprimorar a gestão integrada dos recursos hídricos. O conhecimento pleno do processo hídrico da mina do Sossego é de grande relevância, para que se possa efetuar o planejamento eficiente do uso dos recursos hídricos disponíveis de modo a evitar a falta de água para o empreendimento e os impactos sociais e econômicos que viriam a causar.

Por outro lado, o desenvolvimento e aprimoramento, de modelos de simulação têm fornecido resultados importantes para o planejamento, dimensionamento e manejo de recursos hídricos (SOUZA e GOMES, 2008). Para aplicar tais modelos é indispensável conhecer as variáveis hidrológicas de entrada e de saída de água no reservatório, pois isso pode possibilitar a implementação do desenvolvimento sustentável e provocar transformações nos processos de produção e de consumo (LANNA, 1995). Segundo Tucci (2002), a quantificação das variáveis hidrológicas para uma bacia hidrográfica auxilia no

melhor entendimento do comportamento do sistema e na utilização racional dos recursos hídricos.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo da pesquisa é avaliar as variáveis de entrada e saída do reservatório, verificar quais variáveis exercem maior influência no reservatório e definir o balanço hídrico da mina do Sossego, visando obter subsídios para assegurar a sustentabilidade do uso local de recursos hídricos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

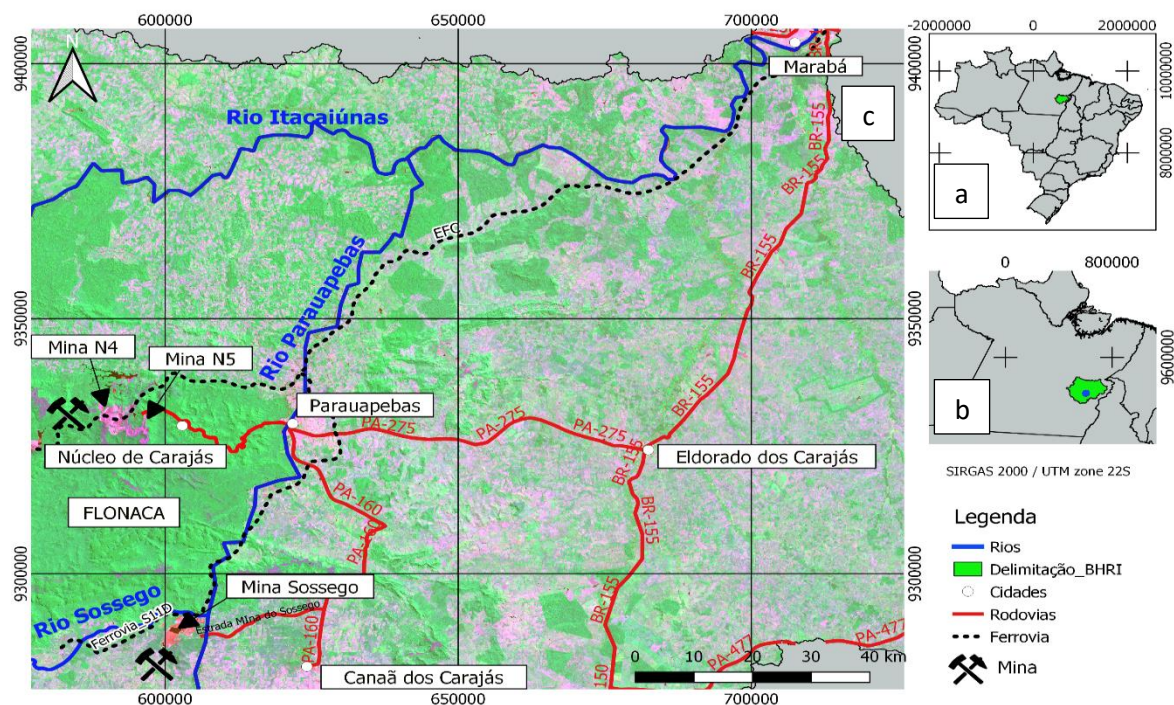
- ✓ Estimar valores para evaporação com base nos dados da estação meteorológica local;
- ✓ Realizar a avaliação sazonal das parcelas hídricas disponíveis na barragem de rejeitos e do consumo de água na Mina do Sossego;
- ✓ Subsidiar o planejamento hídrico, em termos da captação de água do rio Parauapebas para a barragem no período chuvoso, conforme outorga existente, para garantir o suprimento adequado no período seco;
- ✓ Definir anualmente uma das cavas da mina para estocagem de água no período chuvoso para aproveitamento de forma sustentável no período seco;

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na mina do Sossego está localizada em região de clima tropical úmido. Verifica-se uma pequena amplitude térmica entre as normais de temperaturas máximas e mínimas, variando entre os extremos de 31,8°C e 19,2°C, com a temperatura média entre 25,0 a 26,0°C (GOLDER, 2001). A precipitação anual na região do Projeto Sossego é de aproximadamente 1.900 mm e a evapotranspiração é de aproximadamente 1.400 mm (GOLDER, 2001). As coordenadas da barragem são: 602.795,9 mE e 9.289.355,4 mN, SAD69 / UTM zona 22S. O reservatório em estudo está localizado na mina do Sossego em Canaã dos Carajás, sudeste do estado do Pará, sendo seu comportamento influenciado não só por fatores climáticos (RODRIGUES, 2012), como também por suas características próprias. Localiza-se em uma região de relevo plano e vizinho da área protegida da Floresta Nacional de Carajás (FLONACA), ao norte, e de fazendas cobertas por pastagens ao sul (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização da mina do Sossego: a) Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI) no Brasil; b) Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas no estado do Pará; c) Localização da mina do Sossego na região de Carajás no sudeste do Pará. FLONACA = Floresta Nacional de Carajás.



Fonte: Próprio autor, (2019).

4.2 DADOS CLIMATOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS

A Tabela 1 abaixo apresenta um resumo dos dados das variáveis de entrada de água no reservatório bem como das variáveis de saída de água do reservatório além dos períodos referentes aos dados de cada variável.

Tabela 1 - Variáveis de entrada de água no reservatório e variáveis de saídas de água do reservatório, período dos dados e modo de medição ou calculado.

VARIÁVEL	ENTRADA	SAÍDA	PERÍODO	MEDIDO	CALCULADO
Precipitação no Lago (m ³)	✓	-	2004-2018	-	✓
Vazão Afluente (m ³)	✓	-	2017-2018	-	✓
Bombeamento das Cavas (m ³)	✓	-	2015-2018	-	✓
Bombeamento do Rio (m ³)	✓	-	2015-2018	✓	-
Vazão da Usina (m ³)	✓	-	2015-2018	-	✓
Evaporação (m ³)	-	✓	2017-2018	-	✓
Infiltração (m ³)	-	✓	2017-2018	-	✓
Percolação (m ³)	-	✓	2017-2018	-	✓
Bombeamento para Usina (m ³)	-	✓	2017-2018	✓	-
Vertimento (m ³)	-	✓	2017-2018	✓	-

Fonte: próprio autor, (2019).

O cálculo da precipitação no lago é um dos componentes mais importantes do balanço hídrico. Ao contrário de outras variáveis meteorológicas (ex: temperatura; umidade relativa; ventos etc), que podem ser medidas de forma contínua, a precipitação é um fenômeno de tipo descontínuo, que varia no espaço e no tempo (FEITOSA *et al.*, 2008). Os dados de pluviometria utilizados neste estudo são provenientes da estação meteorológica da mina do Sossego que possui registro histórico a partir do ano de 2004.

O volume de água bombeado rio Parauapebas é medido através de hidrômetro instalado na tubulação, dados disponíveis a partir de 2015. O volume de água bombeada das cavas e o volume de água captada da barragem para usina de beneficiamento são calculados através de medidas diretas em horímetros de painéis elétricos multiplicado pela vazão nominal das bombas que desconsidera a perda de carga, sendo os dados disponíveis a partir do ano de 2015 e a partir de 2017 respectivamente. Já os dados de evapotranspiração, assim como de outras variáveis necessárias para calcular a evaporação, cobrem os anos de 2017 a 2018. O volume lançado na barragem é a partir de 2015 também.

Os dados climatológicos e hidrológicos do reservatório barragem do Sossego, citados acima, são registrados com periodicidade mensal em um banco de dados e foram

disponibilizados para o presente autor. Com isso, foi possível determinar as variáveis de entrada e de saída de água da barragem.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM DA MINA DO SOSSEGO

A figura 2 fornece uma visão geral da distribuição espacial das principais estruturas que compõem a mina do Sossego. Nela podem ser visualizadas a área coberta pela barragem de rejeitos e a relação entre a superfície ocupada pelo rejeito e pelo reservatório de água.

As entradas (Figuras 3 e 4) de água na barragem de rejeito do Sossego são: 1 - Precipitação no lago; 2 - Vazão afluyente; 3- Água bombeada rio Parauapebas; 4 - Água bombeada das cavas da mineração e 5 - Água lançada junto com o rejeito a partir da usina de beneficiamento.

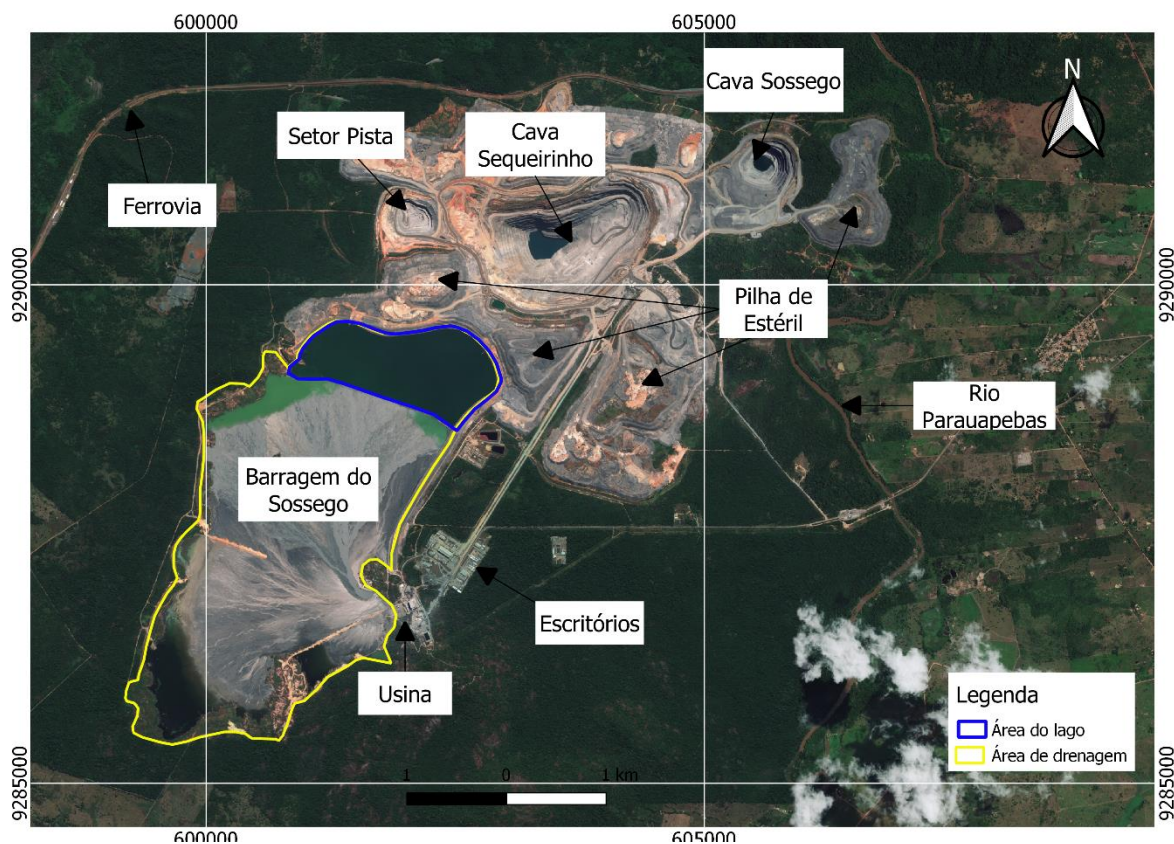
No caso da barragem do Sossego, devido à sua localização e particularidades de concepção, não há aporte de água a partir de drenagens ou cursos d'água locais. As saídas (Figuras 3 e 4) de água da barragem são: 1 - Evaporação; 2 - Percolação pelo dreno de fundo; 3 - Bombeamento para usina de beneficiamento; 4 - Infiltração e 5 - Vertimento.

A precipitação pluviométrica é a mais importante variável de entrada de água em um reservatório tipo barragem. As principais grandezas para se caracterizar a precipitação são: altura pluviométrica, duração, intensidade e frequência da precipitação (GARCEZ, 1974). Para o presente estudo os dados de precipitação foram obtidos na estação meteorológica da própria mina (Figura 5). A água bombeada de outras fontes pode ser medida por meio de hidrômetros na tubulação que conduz a água, sendo que procedimento análogo pode ser adotado para a água proveniente da usina para barragem.

A evaporação é o processo natural pelo qual há transformação em vapor da água da superfície ou de cursos d'água, lagos e mares (BARBOSA JÚNIOR, 2002). Ela é uma variável fundamental para cálculo da saída de água de um reservatório e pode ser medida de forma direta com um tanque classe A ou com evaporímetros, de forma indireta através de métodos empíricos baseados em informações de estações climatológicas (PEREIRA, 2004) ou, ainda, por outros métodos, conforme exemplificado em vários estudos (MORTON, 1983a; LINACRE, 1993; KOHLER *et al.*, 1995; VIEIRA, 2016).

A área do lago bem como a área de drenagem varia em função do aumento ou diminuição da área do lago, isso está diretamente relacionado ao aumento de volume de água no reservatório, ou seja, é uma variação sazonal que é medida através de batimetria no reservatório.

Figura 2 - Disposição das principais estruturas que compõem a mina do Sossego, dentre elas estão a barragem, as pilhas de estéril, as cavas, escritórios administrativos e usina de beneficiamento; já no entorno estão a ferrovia do S11D e o rio Parauapebas.



Fonte: Próprio autor, (2019).

Uma das variáveis importantes referentes à saída de água da barragem é a percolação que se dá pelo dreno de fundo da barragem. Na figura 4 é apresentada uma seção transversal esquemática da barragem do Sossego que permite visualizar sua estrutura. A barragem possui um filtro arenoso na zona 3 que compõe o maciço construído e toda água do reservatório fica em contato com a zona 2, de solo compactado, percola até a zona 4 do filtro e, posteriormente, é direcionada até o dreno de fundo do reservatório.

Precipitação

Evaporação

Água e rejeitos lançados na barragem

Bombeamento das Cavas para barragem

Caminhão pipa da IBQ

Volume Útil

Volume Morto

2m

Maciço da Barragem

Água Recuperada para Usina

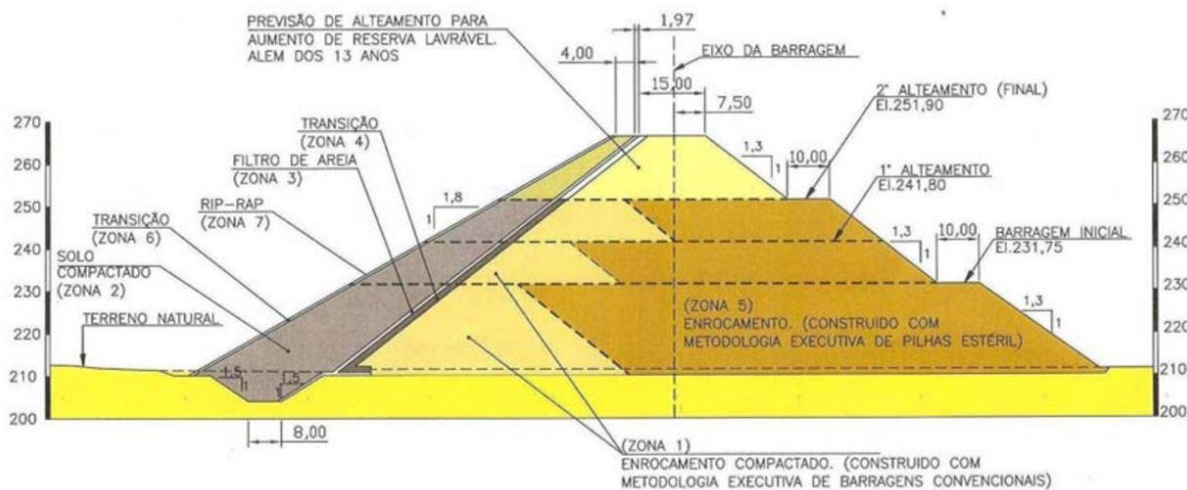
Rejeito

Água Retida no Rejeito

Infiltração Natural

Dreno de Fundo Percolação

Figura 4 - Seção transversal esquemática da barragem do Sossego.



4.4 METODOLOGIA

22

velocidade do vento e radiação, ou utiliza medidas de tanques de evaporação localizados em estações meteorológicas no ambiente terrestre, as quais são pouco representativas do ambiente sobre o lago (REIS; DIAS, 1998), porém não se dispõe de nenhuma medida direta para a barragem do Sossego. Deve-se, portanto, recorrer a métodos estimados. Destes, os mais conhecidos são: transferência de massa, balanço de energia, balanço hídrico e equações empíricas. Optou-se neste estudo por utilizar as equações empíricas de Penman (1948) e Linacre (1993).

Linacre (1993) afirma que em muitos locais, as únicas medidas de clima confiáveis disponíveis são as de temperatura mínima diária da tela, máxima diária, precipitação e velocidade do vento. No entanto, mesmo as temperaturas são suficientes para estimar a evaporação média mensal do lago E_0 , usando a seguinte versão simplificada da fórmula de Penman e apresentada por Coelho (2016):

$$E_R = (0,015 + 0,00042 T + 10^{-6} h) [0,8 R_s - 40 + 2,5 F u_2 (T - T_d)] \quad \text{Eq (1)}$$

Em que:

E_R = evaporação do reservatório (mm/mês); T = temperatura média mensal do ar ($^{\circ}\text{C}$); R_s = radiação solar incidente na superfície do reservatório (W/m^2); F = fator de correção devido à altitude do local (adimensional); u_2 = velocidade do vento a 2 m de altura (m/s); h = altitude do local (m); e T_d = temperatura média mensal do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$).

Segundo Feitosa *et al.* (2008), a equação do balanço hídrico obedece ao princípio da conservação da massa ou princípio da continuidade, o qual estabelece que a diferença entre as entradas e as saídas, em um sistema qualquer, é igual à variação do armazenamento dentro do sistema. Diante disso é importante quantificar todas as variáveis de entradas e de saídas do sistema em estudo.

Segundo Righetto (1998), a equação geral do balanço hídrico pode ser expressa pela Equação 1:

$$V_e - V_s = \Delta S \quad \text{Eq (2)}$$

Onde:

V_e é vazão de entrada, V_s a vazão de saída e ΔS a variação de armazenamento de água do sistema.

O balanço hídrico do reservatório foi realizado a partir da soma de todas as variáveis de entrada de água menos todas as saídas de água do reservatório em um determinado intervalo de tempo, sendo utilizado para isso a equação do Balanço Hídrico apresentada por Tucci (2007). A equação fundamental tem seguinte escrita (Equação 2):

$$\Delta V / \Delta t = I - Q - E_0 * A + P * A \quad \text{Eq (3)}$$

Onde:

V: volume de água contida no reservatório (mm/mês); t: tempo (s); I = vazão total de entrada no reservatório (m³/s); Q = vazão de saída do reservatório (m³/s); A: Área do lago (km²); P: Precipitação total sobre a superfície do espelho de água formado pelo reservatório (mm/mês); $\Delta V / \Delta t$: corresponde à variação do volume no reservatório em um intervalo de tempo (m³/s).

A equação 2 de Tucci (2007) pode ser adaptada da seguinte forma Walm (2019):

$$\begin{aligned} \Delta V / \Delta t = \sum & (P_{direta} * A_L + Q_{afluente} * A_R + Q_{cavas} + Q_{rio} + QE_{usina}) \\ & - \sum (E_0 * A_L + Q_{infiltração} + Q_{percolação} + QS_{usina} \\ & + Q_{vertimento}) \end{aligned} \quad \text{Eq (4)}$$

Onde:

$\Delta V = V_f - V_o$ É a variação no volume, onde V_f é o volume final e V_o é o volume inicial;

Δt : Intervalo de tempo (mensal);

P_{direta} : Intensidade de chuva precipitada na área do lago;

A_L : Área do lago;

A_R : Área de drenagem que é a área do reservatório total menos a área do lago;

$Q_{afluente}$: Vazão afluyente (considera-se como tal o volume de chuva sobre o restante da bacia da área da barragem, excluindo a área ocupada pela água, multiplicado por um coeficiente de escoamento superficial em m³/mês);

Q_{cavas} : Vazão referente ao volume de água que é bombeado das cavas para a barragem (m³/mês);

Q_{rio} : Vazão referente ao volume de água bombeado do rio Parauapebas de dezembro a maio através de uma outorga sazonal (m³/mês);

QE_{usina} : Vazão referente a água proveniente da usina a partir da polpa de rejeitos (m³/mês);

$Q_{infiltração}$: Vazão referente ao volume de água que infiltra na fundação da barragem (m³/mês);

$Q_{\text{percolação}}$: Vazão referente ao volume de água que percola pelo dreno de fundo da barragem e é medido na calha Parshall ($\text{m}^3/\text{mês}$);

Q_{usina} : Vazão referente a água bombeada para uso no beneficiamento do minério na usina ($\text{m}^3/\text{mês}$);

$Q_{\text{vertimento}}$: Vazão referente ao volume de água vertente pelo sistema de extravasor ($\text{m}^3/\text{mês}$).

Feitosa *et al.* (2008) enfatizam que pensar que a equação desse balanço é simples é enganoso, pois na prática nem sempre os seus termos podem ser facilmente ou adequadamente quantificados. Relatam também que a dificuldade na solução de problemas práticos decorre, principalmente, da incapacidade de se medir ou estimar com segurança os vários termos da equação supracitada. Em estudos em áreas restritas, é quase sempre possível fazer estimativas confiáveis, porém quantificações regionais são, geralmente, aproximações grosseiras. No presente estudo, a situação é favorável porque se trata de um estudo local, limitado à barragem da mina do Sossego.

A batimetria serve para posterior geração de um modelo topográfico do relevo, da superfície do terreno submerso. Para que o modelo de terreno seja mais fiel à realidade, é essencial que o levantamento batimétrico atinja a maior área possível, segundo Silva (2007). Diversos instrumentos podem ser empregados na medição de profundidades, dentre eles: o prumo de mão, a máquina de sondar, as estádias e o ecobatímetro, segundo Krueger *et al.* (2003). Para barragem do Sossego foram realizadas seis batimetrias com uso do ecobatímetro Syqwest bathy-500HD para medição das profundidades através do sensor do equipamento e uso dos softwares Hypack e Hydromagic para tratativa dos dados e cubagem dos volumes de água no reservatório. A Tabela 2 apresenta um resumo das batimetrias. As áreas do lago e de drenagem medidas nas batimetrias serão úteis para o cálculo do balanço hídrico, sendo que a cada atualização de batimetria foi realizado uma validação dos valores de balanço hídrico e uma correção na planilha de balanço hídrico usando o valor calculado a cada batimetria. Não foi possível realizar batimetria em janeiro de 2018 devido às fortes chuvas no empreendimento e diante disso foi adotado um valor de $0,84 \text{ km}^2$ nos meses de dezembro de 2017 até abril de 2018 a partir de um levantamento realizado com equipamento de estação total de alta precisão de topográfica e leitura do contorno do lago.

Tabela 2 - Data de realização das batimetrias, Área do lago (km²), Área de drenagem (km²) e Volume água medido no reservatório (m³ x 10000).

Data	Área do Lago (km ²)	Área de Drenagem (km ²)	Volume de Água (m ³ x 10000)
17/01/2017	0,33	8,41	95,99
28/06/2017	0,31	8,42	101,49
08/09/2017	0,09	8,64	6,42
10/05/2018	1,28	7,45	624,35
24/08/2018	1,19	7,54	411,74
11/12/2018	1,15	7,58	441,08

Fonte: Próprio autor, (2019).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

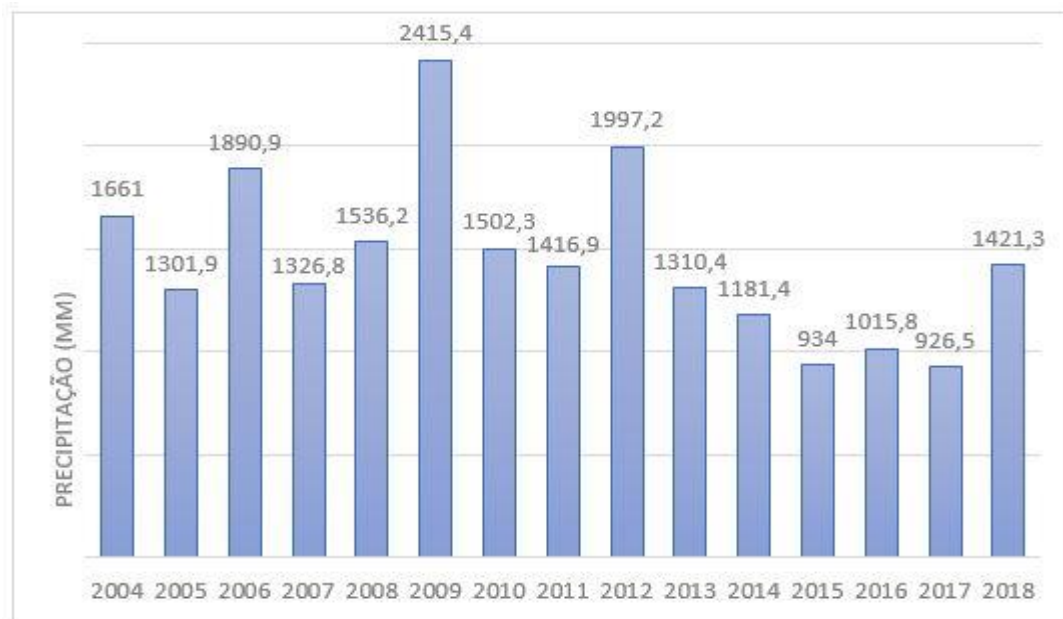
Os dados hídricos foram utilizados para definir o balanço hídrico da mina do Sossego para os anos de 2017 e 2018, a partir das variáveis de entrada e saída do reservatório e verificar quais variáveis exercem maior influência no reservatório.

5.1 VARIÁVEIS DE ENTRADA DE ÁGUA NO RESERVATÓRIO

5.1.1 Precipitação

A Figura 5 apresenta os dados de pluviometria anuais obtidos a partir dos dados acumulados de pluviosidade mensais na área em estudo. Estes dados são provenientes da estação meteorológica da mina do Sossego e cobrem o período de janeiro de 2004 a dezembro de 2018. Os resultados mostraram uma pluviosidade média anual superior a 920 mm, com o predomínio de valores médios de 1.400 mm, típico de clima tropical (BRASIL, 1992). Observa-se que o índice de chuva mostrou seu maior registro em 2009 e após 2012 houve um decréscimo nos valores de precipitação, com valores mínimos em 2015 e 2017, inferiores a 1000 mm/ano.

Figura 5 - Pluviometria anual (em mm) na região da mina de Sossego.



Fonte: Próprio autor, (2019).

A pluviometria em escala mensal no período de 2004 a 2018 na região da mina do Sossego apresenta sazonalidade característica de clima tropical com estação seca (Aw), segundo Köppen-Geiger (PEEL *et al.*, 2007), com duas estações bem definidas (MORAES *et al.*, 2005; SILVA JÚNIOR *et al.*, 2017): período chuvoso (outubro a maio), com precipitações médias atingindo valores de 171 mm por mês entre os anos de 2004 e 2018 (Tabela 3); e período seco (junho a setembro), com uma estiagem pronunciada em julho quando a precipitação é tipicamente da ordem de 9 mm por mês em média (Figura 6).

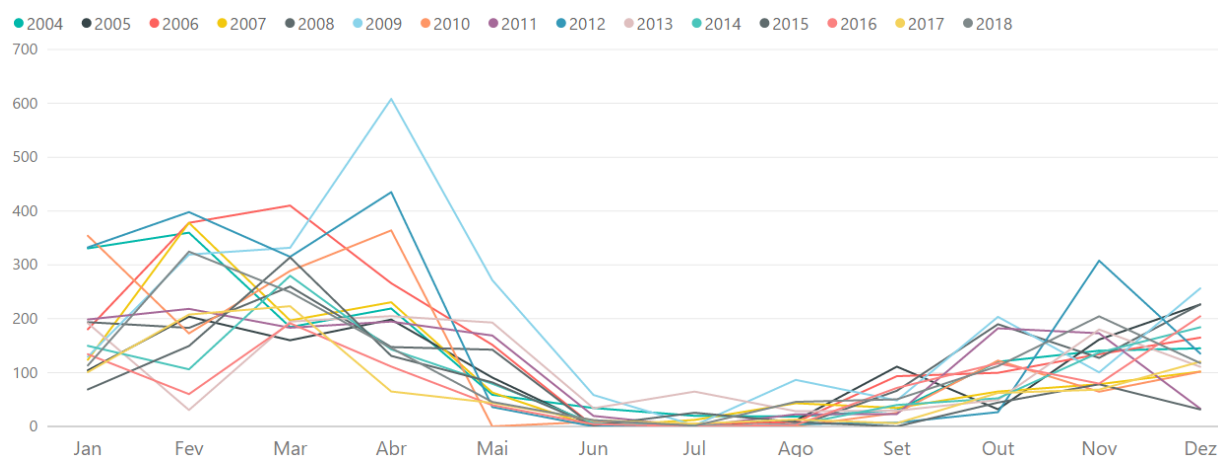
Tabela 3: Precipitação mensal (em mm) registrada na estação meteorológica do Sossego no período de 2004 e 2018.

Ano/ Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2004	330,7	359,8	184,5	219,0	58,7	34,2	19,7	18,3	30,3	120,1	140,6	145,1
2005	104,2	203,9	160,0	198,4	90,7	1,5	1,8	10,9	111,0	31,8	161,3	226,4
2006	180,4	378,1	410,1	265,9	151,5	0,7	4,4	7,9	93,3	99,6	134,1	164,9
2007	123,9	378,1	196,8	230,6	62,9	0,0	12,1	43,0	34,4	64,8	78,4	101,8
2008	193,6	183,0	259,8	147,4	142,5	0,0	0,0	0,0	66,2	189,8	127,3	226,6
2009	129,4	319,2	331,8	608,2	271,5	58,4	2,0	86,4	48,3	203,5	100,4	256,3
2010	354,0	172,8	288,8	364,0	0,0	8,7	0,0	0,4	25,2	122,3	64,5	101,6
2011	198,6	218,3	183,3	194,7	168,8	19,5	0,0	22,5	23,0	182,2	173,0	33,0
2012	332,5	398,0	315,0	435,0	36,0	0,0	0,0	4,0	7,0	26,5	307,8	135,4
2013	191,7	30,5	194,8	204,8	192,9	33,8	64,7	28,3	29,2	49,2	180,0	110,8
2014	149,6	106,0	279,8	143,0	79,2	6,1	1,1	3,1	39,9	52,3	137,3	184,2
2015	68,7	149,3	314,0	131,0	81,7	1,7	25,4	8,0	0,0	44,3	78,3	31,6
2016	134,0	60,0	191,6	111,2	39,5	4,2	0,1	2,7	71,5	117,2	79,5	204,5
2017	100,9	207,8	223,3	64,9	43,8	11,4	5,2	12,7	5,9	62,2	68,3	120,2
2018	113,3	324,6	249,3	145,6	45,5	11,7	1,3	45,6	50,3	111,9	204,5	117,6

Fonte: Próprio autor, (2019).

Esta sazonalidade exerce influência crítica na gestão dos recursos hídricos na região porque há uma alternância marcante entre período de alto índice pluviométrico e outro de reduzida precipitação. Em anos de precipitação em torno da média histórica ou acima dela, o reservatório da barragem tende a acumular volume expressivo de água e isto faz que seja reduzida a necessidade de captação de água do rio Parauapebas para aumentar as reservas da barragem. Porém, em anos recentes, entre 2015 e 2017, os níveis de precipitação se situaram em torno de 1000 mm/ano e foram os mais baixos do período monitorado. Foi neste período que o volume de água do reservatório atingiu seu menor valor e chegou a haver a ameaça de não haver disponibilidade de água para atender as demandas da mina. Em consequência, se ampliou a dependência de captação de água do rio Parauapebas durante a estação chuvosa, no esforço de cobrir o déficit existente.

Figura 6 - Pluviometria mensal, no período de 2004 a 2018 na região da mina do Sossego.



Fonte: Próprio autor, (2019).

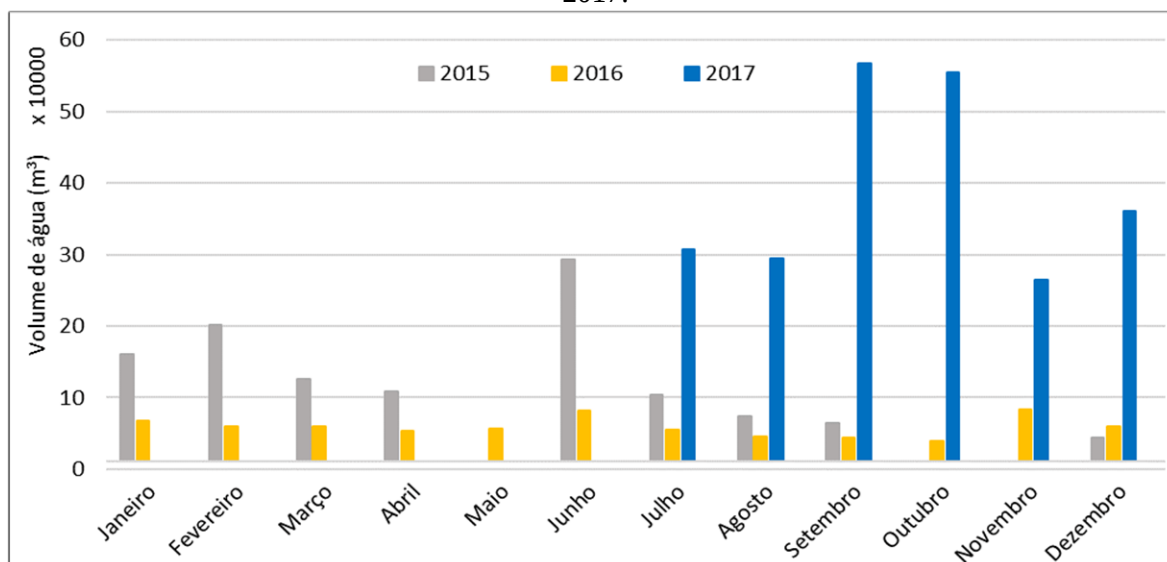
5.1.2 Água bombeada da cava Sequeirinho, setor Pista e cava Sossego

Há três cavas de extração de minério de onde é bombeada água para o reservatório. São elas a cava do Sequeirinho, o Setor Pista e a cava do Sossego. Estas fontes de água para o reservatório foram utilizadas de modo variado ao longo dos anos de 2015 e 2018, sendo mostrado a seguir como se deu o bombeamento de água destes três setores, caso a caso.

A Figura 7 mostra os valores de bombeamento de água da cava do Sequeirinho no período de 2015 até 2017. No ano de 2015 os volumes bombeados foram maiores de janeiro a julho, acima de 100.000 m³/mês devido não ter ocorrido bombeamento em 2014 e acumulou para o ano seguinte, já o mês de maio de 2015 não foi realizado bombeamento. No ano de 2016, tem-se um quadro em linhas gerais valores baixos e próximos a 50.000 m³/mês devido a condições operacionais e volumes menores por não ter ocorrido estoque no ano

anterior. Já no ano de 2017 há tendência para volumes maiores de água bombeada, chegando a atingir valores próximos a 60.000 m³/mês nos meses de setembro e outubro, observa-se que houve um acúmulo de água nos seis primeiros meses do ano e bombeamento para reposição dos valores na barragem somente após o mês de julho.

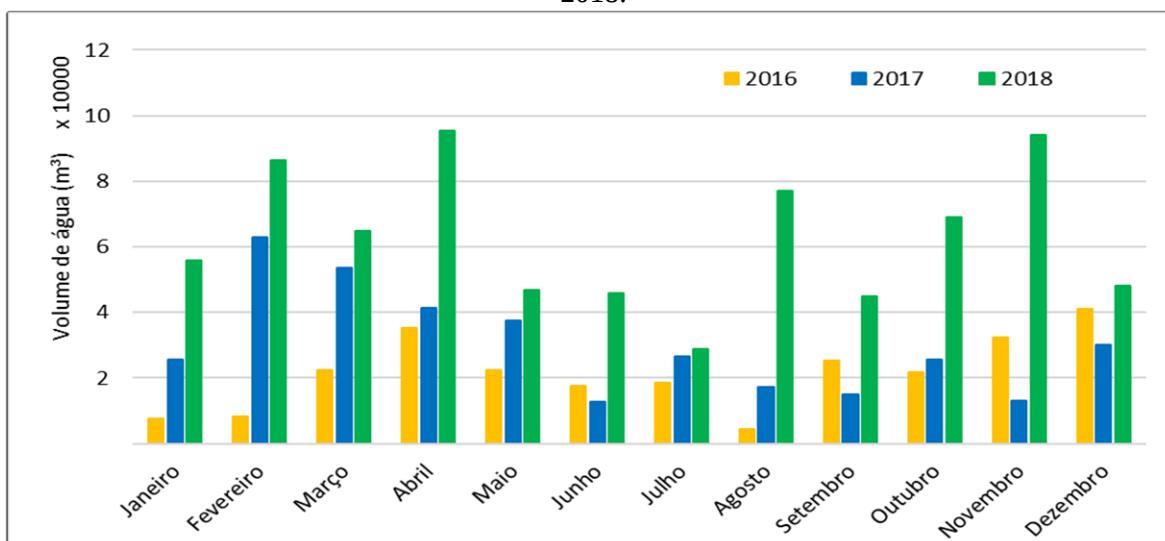
Figura 7 - Volume de água bombeada (m³ x 10.000) da cava do Sequeirinho nos anos de 2015 até 2017.



Fonte: Próprio autor, (2019).

O Setor Pista é uma ampliação da cava do Sequeirinho e os dados de bombeamento nessa cava são de 2016 a 2018 (Figura 8). A técnica de bombeamento é utilizada para remover a água das chuvas e o fluxo das águas subterrâneas penetrando a cava (ANA, 2006). Constata-se que foi bombeado maior volume de água nos meses chuvosos e menor nos meses de seca. Isto reflete a tendência de correlação positiva entre o volume de água disponível para bombeamento e o índice de precipitação mensal.

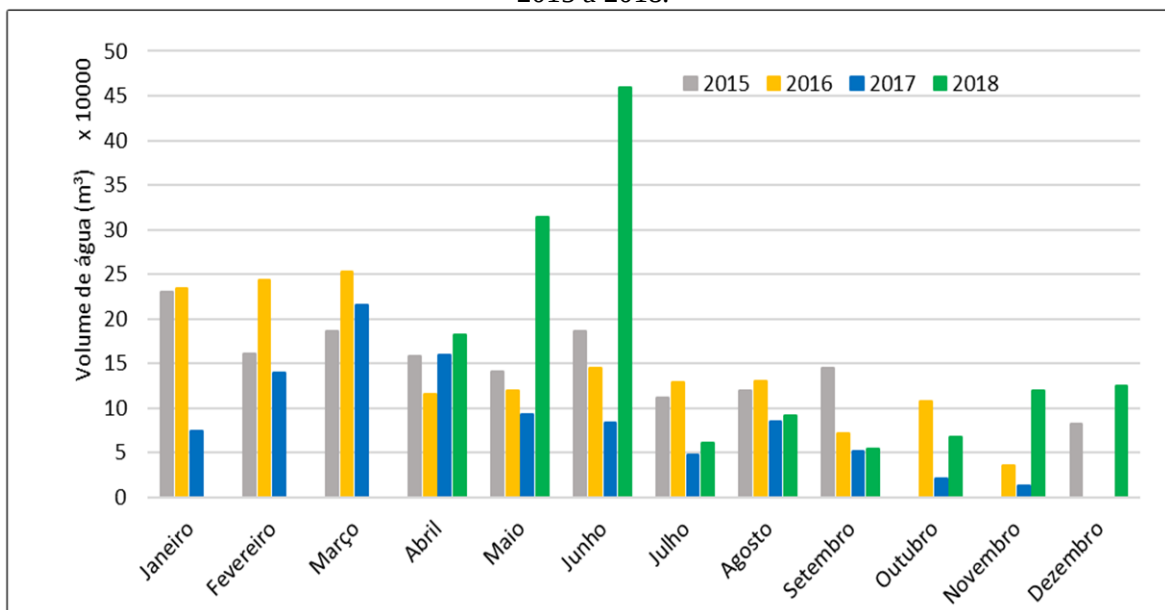
Figura 8 - Volumes mensais de água bombeada ($\text{m}^3 \times 10.000$) do Setor Pista nos anos de 2016 a 2018.



Fonte: Próprio autor, (2019).

Houve bombeamento da água da cava do Sossego de 2015 a 2018 (Figura 9), no qual o volume de água bombeado nos meses de janeiro a março de 2015 e 2016 foram os maiores registrados nesse período, observando-se acentuada variação ao longo do ano. Em 2017, os volumes bombeados são comparativamente menores e em 2018 houve operações de bombeamento desta cava somente após o mês de abril devido ao acúmulo de água na cava de dezembro de 2017 até março de 2018.

Figura 9 - Volumes mensais de água bombeados ($\text{m}^3 \times 10.000$) da cava do Sossego nos anos de 2015 a 2018.



Fonte: Próprio autor, (2019).

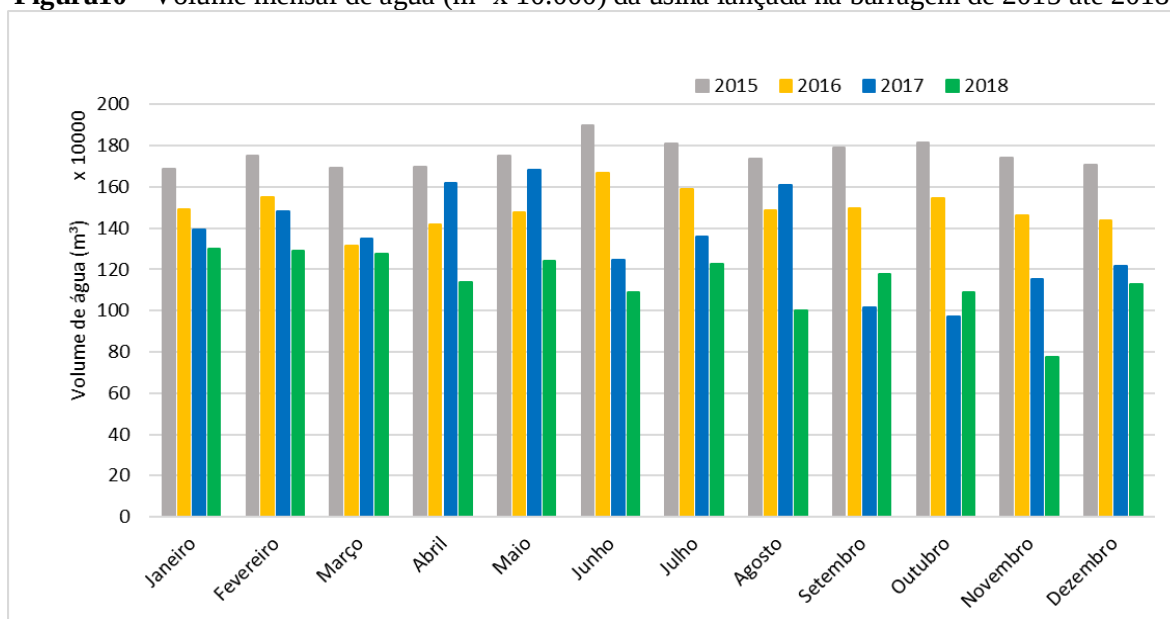
5.1.3 Água da usina lançada na barragem

Conforme discutido anteriormente, o tratamento do minério sulfetado da mina do Sossego se dá na usina, sendo consumido $1,34 \text{ m}^3$ de água para cada $1,00 \text{ m}^3$ de minério beneficiado. Após o minério ser moído, se transforma em uma polpa composta de água e materiais finos provenientes do minério moído. Tal polpa é direcionada por gravidade até as células de flotação. O último circuito de flotação na usina do Sossego é o *scavenger* que possui vazão final de aproximadamente $1.000 \text{ m}^3/\text{h}$ de polpa com 5% de sólidos presentes. Todo o volume de água que entra no moinho Semiautógeno (SAG) é distribuído nas etapas de rebitagem, flotação, espessamento e filtração, em formato de circuito fechado. Na filtração, admite-se uma umidade máxima de 10% no concentrado final, sendo que esta percentagem de água representa a única perda em função do circuito fechado adotado.

A polpa proveniente do beneficiamento do minério da usina é lançada na barragem contendo cerca de 35% de sólidos. O volume de água que é lançado na barragem é calculado pela diferença entre o volume de água que entra no SAG e o volume que sai junto com o concentrado. Entretanto, as características do rejeito revelam que há uma porosidade entre os espaços vazios do rejeito de aproximadamente 49%, de acordo com estudo feito durante a implantação do projeto (GOLDER, 2001), ou seja, de toda água lançada no ponto de lançamento da polpa de rejeitos, somente 51% do volume total realmente chega ao reservatório do lago principal.

O volume de água lançado no reservatório foi monitorado desde 2004 até 2018, porém, em função do período de interesse do estudo, serão considerados apenas os dados de 2015 até 2018 (Figura 10). Há uma nítida tendência de decréscimo do volume de água lançado de 2015 para os anos seguintes, chegando-se ao menor volume em 2018. Isto ocorreu devido a melhorias operacionais desenvolvidas na usina de beneficiamento, como, por exemplo, instalação de uma bomba no final das colunas de flotação que possibilitou o retorno de 25% do volume total de água para o moinho. Como esta água era antes lançada na barragem, isto implicou uma redução substancial do volume de água chegando ao reservatório.

Figura10 - Volume mensal de água ($\text{m}^3 \times 10.000$) da usina lançada na barragem de 2015 até 2018.



Fonte: Próprio autor, (2019).

5.1.4 Água bombeada do rio Parauapebas

A Tabela 2 mostra o volume de água bombeado do rio Parauapebas, desde 2015 até 2018. Observa-se aumento acentuado deste volume em 2018 quando comparado com os demais anos. A água retirada do rio Parauapebas sempre foi para abastecimento da estação de Tratamento de Água – ETA, para consumo industrial e humano em atendimento a refeitórios, banheiros e demais áreas administrativas, porém a partir de 2018 foi concedido pelo órgão ambiental estadual uma outorga para bombeamento de forma sazonal, de dezembro a maio. Essa outorga é estratégica e essencial para manter um bom volume de água na barragem no período chuvoso e que seja suficiente para utilização da usina até a chegada do próximo ciclo chuvoso.

Tabela 4 - Volume de água (em m³) bombeado do rio Parauapebas de 2015 até 2018.

Mês	Ano 2015	Ano 2016	Ano 2017	Ano 2018	Média de 2015 a 2017
Jan	13.198,00	56,00	15.650,00	780.017,00	202.230,00
Fev	11.211,00	127,00	13.000,00	1.235.398,00	314.934,00
Mar	9.424,00	7.200,00	15.700,00	1.471.704,00	376.007,00
Abr	8.368,00	19.200,00	16.450,00	453.904,00	124.481,00
Mai	9.656,00	11.700,00	43.750,00	270.916,00	84.006,00
Jun	9.862,00	13.200,00	15.900,00	15.630,00	13.648,00
Jul	7.863,00	9.206,00	15.700,00	10.618,00	10.847,00
Ago	8.778,00	0,00	0,00	0,00	2.195,00
Set	749,00	0,00	0,00	0,00	187,00
Out	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nov	0,00	6.810,00	0,00	7.181,00	3.498,00
Dez	0,00	14.500,00	0,00	113.954,00	32.114,00
Total	79.109,00	81.999,00	136.150,00	4.359.322,00	1.164.145,00

Fonte: Próprio autor, (2019).

5.1.5 Vazão Afluente

De acordo com Martins (1973), parte da água das chuvas é absorvida pela vegetação, e outros obstáculos, e posteriormente evaporada. Quando atinge o solo, parte é retida em depressões do terreno e parte é infiltrada. Assim que o solo alcança sua capacidade máxima de absorver a água, ou seja, quando os espaços nas superfícies retentoras tiverem sido todos preenchidos, ocorre o escoamento superficial da água restante em direção ao lago principal. Com isso, a vazão afluente é representada, neste estudo, pela precipitação que ocorre nas áreas do reservatório ocupada pelos rejeitos e que contribui como entrada de água no lago.

Considerando estudos de implantação do projeto Sossego elaborado por Golder (2008), para cálculo da vazão afluente, foi considerado o método racional desenvolvido por Thomas Mulvaney, em 1851. Conforme Golder (2008), a equação utilizada para o cálculo das vazões de projeto foi:

$$Q_p = 0,278 * C * i * A \quad \text{Eq 5}$$

Onde:

Q_p = vazão máxima afluyente aos dispositivos de drenagem, para duração igual ao tempo de concentração (m^3/s); C = coeficiente de escoamento (igual a 0,55, adotado como representativo dos solos de pequena espessura, baixa permeabilidade, com alto teor de argila, existentes na área do projeto Sossego); A = área de drenagem (km^2); i = intensidade de precipitação (mm/h).

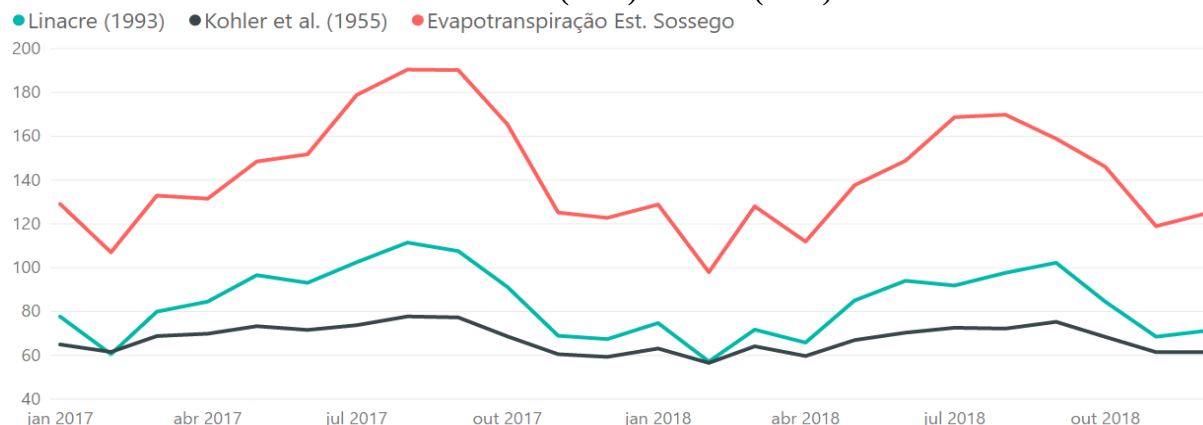
5.2 VARIÁVEIS DE SAÍDA DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO

5.2.1 Evaporação

A estação meteorológica do Sossego estima somente a evapotranspiração a partir do método de FAO Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998). A evapotranspiração nada mais é que a soma da perda de água do solo e/ou lago por evaporação e da perda de água da planta por transpiração. No entanto, para este trabalho, como o objeto de estudo é uma barragem desprovida de vegetação, utilizaremos como variável de saída no balanço hídrico apenas a evaporação de água do reservatório. Para calcular a evaporação mensal de água da barragem do Sossego foram adotados dois métodos: Linacre (1993) e Kohler (1995).

Comparando os dados de evapotranspiração com os dados calculados de evaporação (Figura 11), observa-se que o método Linacre apresentou maior similaridade com os dados de evapotranspiração do que o método Kohler, que mostra um gráfico menos sinuoso. Chama a atenção, em particular, o fato de o método Linacre indicar claramente aumentos de evaporação durante os períodos secos e diminuição naqueles de maior precipitação. Isto indica maior consistência nos resultados obtidos pelo método Linacre, em relação ao método Kohler. Em razão disso, os valores de evaporação utilizados no balanço hídrico se basearam naqueles fornecidos pelo método Linacre.

Figura 11 - Comparativo entre os dados de evapotranspiração da estação meteorológica do Sossego, nos anos de 2017 e 2018, com os dados de evaporação (mm/mês) calculados pelos métodos Linacre (1993) e Kohler (1995).



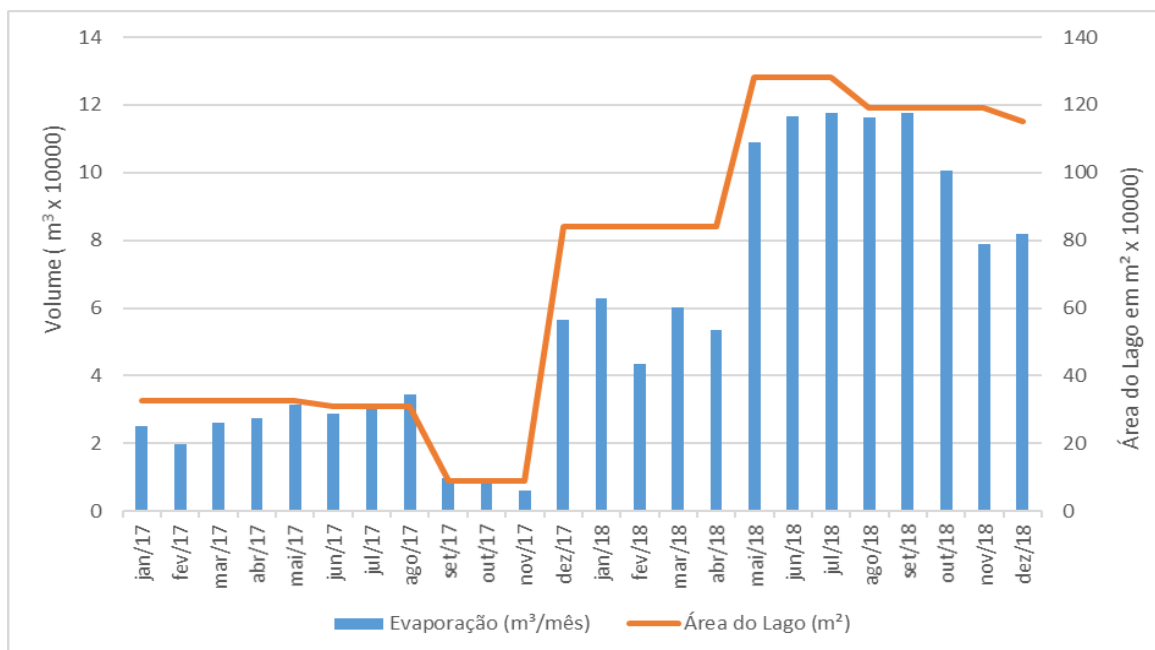
Fonte: Próprio autor, (2019).

Leitão *et al.*, (2007) avaliaram o desempenho de diferentes métodos para estimativa da evaporação de lagos em duas regiões na Paraíba (Boqueirão e Patos) e constataram que os métodos que utilizam a umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar apresentaram os melhores desempenhos. Linacre (1993) propôs uma nova modificação, englobando dados de precipitação e velocidade do vento, e a testou em três lagos dos Estados Unidos, obtendo resultados satisfatórios com o novo método. O método de Linacre (1993) teve desempenho “muito bom” em Boqueirão e “bom” em Patos, com base nos indicadores estatísticos de Camargo & Sentelhas (1997).

Para condições brasileiras, Pereira *et al.* (2009) estimaram a evaporação do reservatório de Sobradinho – BA, por intermédio dos métodos de Linacre, Kohler e Morton, e concluíram que o método Linacre (1993) superestimou a evaporação. Vieira (2015) confirmou esse resultado, ao estudar a evaporação dos reservatórios de Três Marias-MG e Sobradinho – BA, utilizando seis métodos diferentes e considerando Penman como o padrão.

Para a barragem da mina do Sossego o método de Linacre (1993) apresentou resultados satisfatórios conforme volumes em m³ evaporados por mês apresentados na Figura 12. Os dados e cálculos são apresentados no Anexo 2.

Figura 12 - Comparativo entre os dados de volume ($\text{m}^3 \times 1000$) mensal evaporado do lago da barragem do Sossego versus Área do Lago ($\text{m}^2 \times 1000$) nos anos de 2017 e 2018.



Fonte: Próprio autor, (2019).

5.2.2 Infiltração

O conceito de infiltração foi introduzido no ciclo hidrológico por Horton (1933). Segundo Tucci (1993), a infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo. Ela é um processo que depende, fundamentalmente, do volume de água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar inicialmente presentes no seu interior. Para esse estudo será considerado um valor fixo anual de 360.000 m^3 , sendo $30.000 \text{ m}^3/\text{mês}$, conforme estudo no período de implantação da mina do Sossego (GOLDER, 2001).

Golder (2001) realizou o estudo referente à caracterização hidrogeológica do projeto Sossego e uma das variáveis analisadas foi a infiltração de água na fundação da barragem do Sossego. Foi realizado no período de 25/09/1999 até 30/06/2001 o monitoramento da água subterrânea, ensaio de perda de água sob pressão *Packer Test* e teste de injeção *Slug Test*, a partir de 79 ensaios.

O monitoramento da variação sazonal do nível de água subterrânea local foi realizado por medições diretas, semanalmente, em todos os piezômetros, medidores de nível d'água, furos exploratórios, furos metalúrgicos e em cisternas. Os resultados obtidos por Golder (2001) apresentaram uma variação do nível freático na ordem de 3 a 5 metros, sendo os valores mais altos de dezembro a junho e os mais baixos de julho a novembro.

Os testes de perda de carga sob pressão *packer* foram realizados nos furos geotécnicos, nas sondagens rotativas e nas sondagens mistas, com o objetivo de identificar as zonas permeáveis e impermeáveis a partir de estimativas da variação da condutividade hidráulica com a profundidade do terreno e com o grau de fraturamento do maciço rochoso. A metodologia empregada foi a da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE) que foi desenvolvida por Lugeon em 1933 (HOULSB, 1976). De acordo com Golder (2001), a maior perda de água ocorre nos primeiros 20 metros de profundidade por ser um solo alterado, denominado de modo genérico como saprólito, que apresenta condutividade hidráulica K na ordem de 10^{-3} cm/s, sendo que para profundidades maiores que 200 metros os valores decrescem e chegam a 10^{-7} cm/s.

O *slug test* consiste num rápido deslocamento (injeção ou retirada) da superfície da água num poço ou piezômetro, depois do qual a recuperação (subida ou descida) do nível de água é medida em função do tempo. Golder (2001) empregou a metodologia de Hvorslev para a barragem do Sossego. Os valores obtidos mostram que a variação da condutividade hidráulica K é de 10^{-3} cm/s nas camadas do maciço rochoso muito fraturado e no saprólito, e de 10^{-7} cm/s, em cotas mais profundas, até 150 metros, no maciço de rocha sã e pouco fraturado.

Como as únicas informações disponíveis sobre infiltração na barragem do Sossego são as fornecidas por Golder (2001) e por serem as mesmas ao que tudo indica confiáveis, elas serão utilizadas no balanço hídrico da barragem.

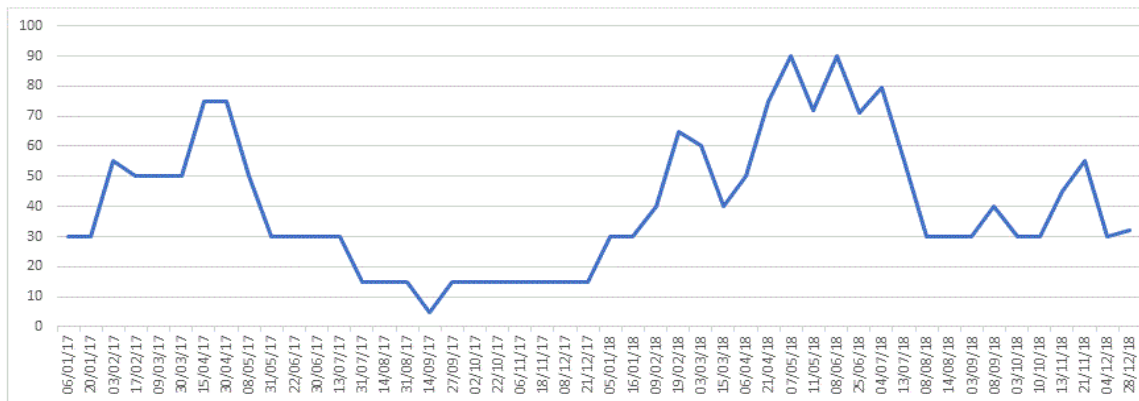
5.2.3 Percolação pelo dreno de fundo da barragem

A barragem do Sossego possui um filtro arenoso na zona 3 que compõe o maciço construído, conforme a sua seção transversal (Figura 4). Toda água do reservatório em contato com a zona 2, de solo compactado, percola até a zona 4 do filtro e, posteriormente, é direcionada até o dreno de fundo do reservatório.

A taxa de vazão de água no dreno de fundo de barragem do Sossego é determinada por medidores tipo calha Parshall, a qual possui uma seção de entrada convergente, uma de estrangulamento e uma de descarga divergente. Todas as seções possuem paredes laterais verticais, mas o fundo da seção de estrangulamento é inclinado no sentido da descarga. A descarga do fluido pelo canal é considerada como escoamento livre quando o nível do líquido pelo canal, após o estrangulamento, for suficientemente baixo para prevenir um retardamento no escoamento e pelo retorno da água. Neste caso, a vazão real é medida de forma direta, em

função da altura H no início da seção convergente (Silveira, 2006). A Figura 13 apresenta as medidas de taxa de vazão de água realizadas em 2017 e 2018, com leituras quinzenais.

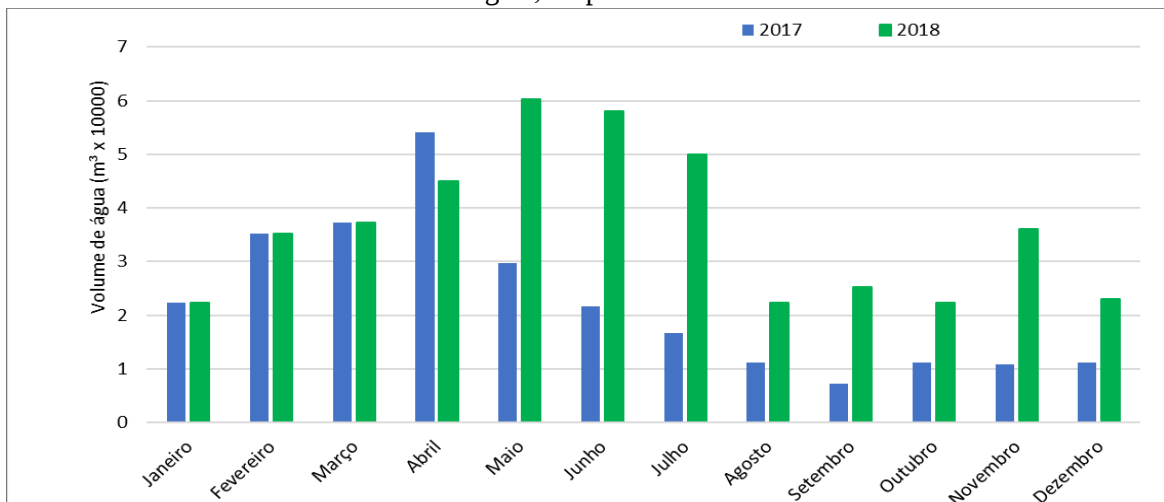
Figura 13 - Vazão de água (em m^3/h) na saída do dreno de fundo da barragem do Sossego, medida na calha Parshall.



Fonte: Próprio autor, (2019).

O cálculo do volume total de água que percolou e saiu no dreno de fundo de barragem é realizado pelas médias das vazões mensais, multiplicada por 24 h e, posteriormente, pela quantidade de dias do mês. A Figura 14 apresenta os valores mensais calculados dos volumes de água percolado.

Figura 14 - Volume total (em $\text{m}^3 \times 10000$) de água que percola durante cada mês pelo dreno de fundo da barragem, no período de 2017 e 2018.



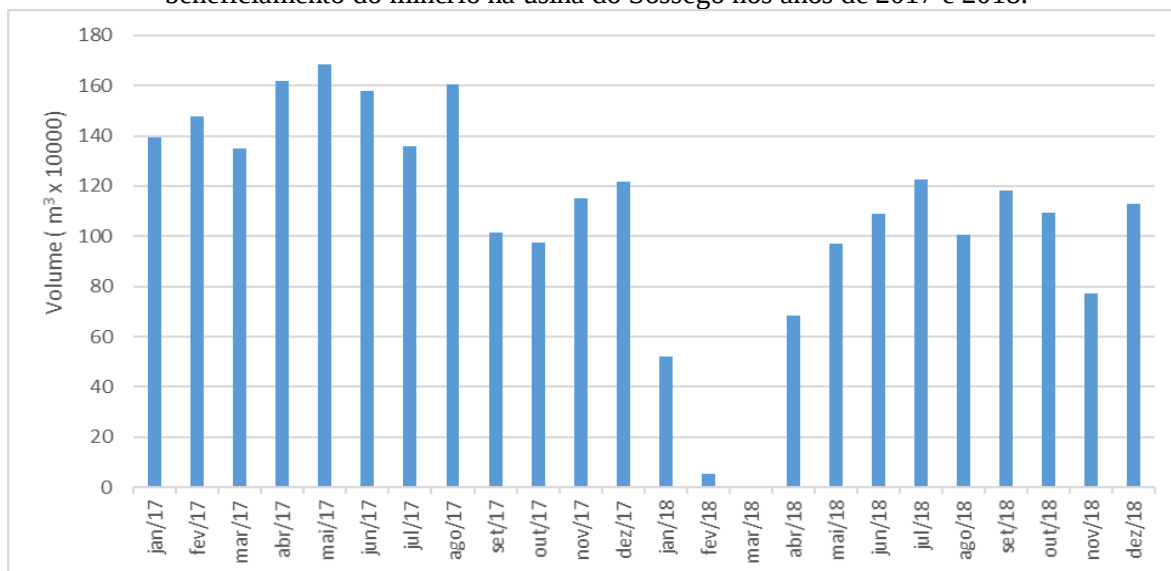
Fonte: Próprio autor, (2019).

5.2.4 Água bombeada da barragem para uso no beneficiamento do minério na usina

Para beneficiamento do minério na usina se faz necessário aporte de um volume de água durante o circuito de moagem e flotação. O registro do volume de água utilizado é controlado diariamente por sistema computadorizado. Há registro destes dados desde o início

das operações em 2004, contudo, para este estudo, serão considerados apenas os volumes de água consumidos em 2017 e 2018 (Figura 15).

Figura 15 - Volume mensal total de água (em m³) que foi bombeado da barragem para uso no beneficiamento do minério na usina do Sossego nos anos de 2017 e 2018.



Fonte: Próprio autor, (2019).

5.2.5 Água de vertimento

A barragem do Sossego não possui vertimento, embora exista um vertedouro para caso de emergência, pois é um reservatório em circuito fechado e sem nenhuma contribuição de drenagem local. Com isso, não há vertimento residual. Logo, para esse estudo será considerado um vertimento nulo. Importante ressaltar que a barragem comporta uma capacidade máxima de 16 milhões de metros cúbicos de água e, a partir desse volume inicia o vertimento. Hoje o reservatório está com 5 milhões de metros cúbicos de água.

5.3 BALANÇO HÍDRICO

O Anexo 1 é o balanço hídrico em formato de planilha com a consolidação das variáveis de entrada de água no reservatório e de saída de água do reservatório.

A área total da barragem do Sossego é de, aproximadamente, 873 hectares, ou seja, 8,73 km². O lago ocupa entre 0,09 a 1,20 km² desta área, que representa de 1% até 14% da área total do reservatório, sendo o restante preenchido por rejeito. Toda precipitação que ocorre na área da barragem ocupada pelo lago é considerada como precipitação direta. Já a precipitação que cai sobre a área ocupada pelo rejeito é chamada de vazão afluente, pois parte da chuva que cai infiltra nos espaços vazios do rejeito e apenas parte dela vai fluir para o lago.

A Tabela 5 apresenta a comparação entre os valores de precipitação direta e a vazão afluente. Observa-se que, em 2017 o volume de chuva no lago representou apenas 7% em relação ao volume total precipitado. Já em 2018 essa porcentagem aumentou para 19%, pois o tamanho do lago alcançou 1,15 km² e em dezembro atingiu a maior área, que foi de 1,28 km². Em 2017 a área do lago variou de 0,33 km² a 0,09 km², conforme levantamento batimétrico realizado pela Vale, em setembro de 2017 (Tabela 1). Este foi o período mais seco do reservatório que dispunha de somente 64.187,00 m³ de água, um volume capaz de garantir o fornecimento de água para a usina de beneficiamento somente por 2 dias (VALE, 2017).

Para o cálculo da precipitação direta no lago foi utilizado os dados de pluviometria (mm) da estação meteorológica do Sossego e dividido por 1.000 para transformar unidade milimétrica (mm) em metro (m) e em seguida multiplicado pela área do reservatório que é em m².

$$\text{Precipitação direta no Lago} = [\text{Pluviometria (mm)} / 1.000] \times \text{Área do Lago (m}^2\text{)}$$

Para o cálculo da Vazão Afluente foi utilizado a Equação (4) que é:

Vazão Afluente (m³/mês) = 0,278 x média mensal por hora da intensidade de chuva (mm/h) x Coeficiente de escoamento (0,55) x Área do Reservatório (km²) – Área do Lago (km²). Sendo o resultado em m³/s, porém barra o balanço hídrico de estudo é mensal e foi realizado uma multiplicação de: m³/s x quantidade de dias de cada mês x 86.400s de um dia. Conforme Anexo 1.

Tabela 5 - Volumes de precipitação direta no lago e vazão afluente nos anos de 2017 e 2018.

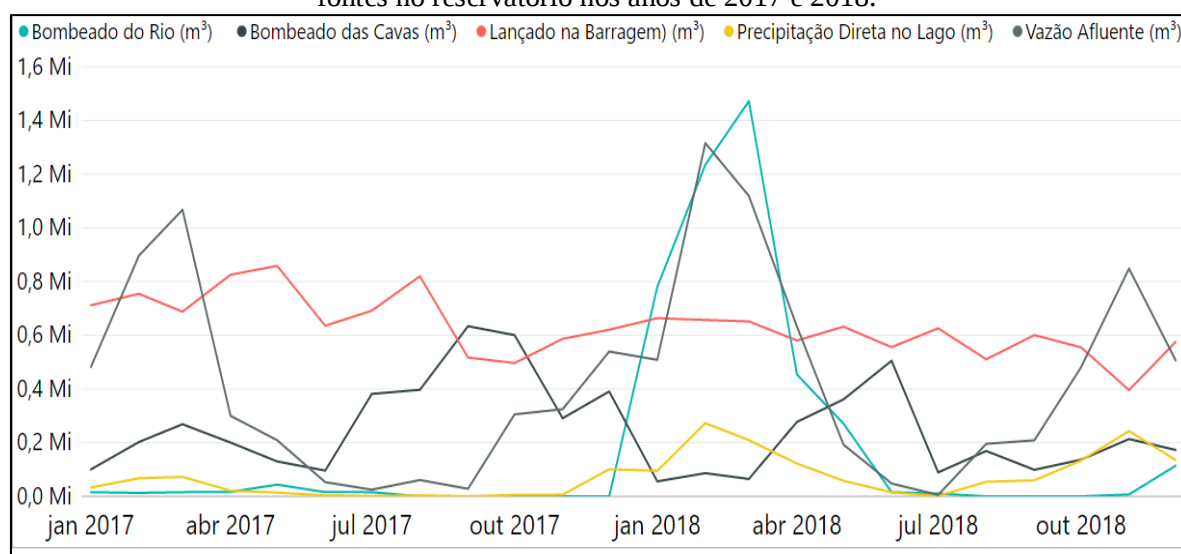
Ano	Precipitação direta no lago (m ³ /ano) [a]	Vazão Afluente (m ³ /ano) [b]	Total (m ³ /ano) [a+b]
2017	330.531,51 (7%)	4.292.800,20 (93%)	4.623.331,71 (100%)
2018	1.400.515,63 (19%)	6.061.789,43 (81%)	7.462.305,06 (100%)

Fonte: Próprio autor, (2019).

A Figura 16 mostra os dados das 5 variáveis de entrada de água no reservatório. Observa-se que o volume mais expressivo é o volume de água lançado da usina na barragem. Ele é, aproximadamente, constante variando mensalmente de 396.010,41 m³ até no máximo 858.521,25 m³, já considerando que 49% fica retido nos espaços vazios do rejeito. A retirada de água do rio Parauapebas é autorizada por uma outorga sazonal, concedida pelo órgão ambiental estadual, que permite o bombeamento de água para uso industrial no período

chuvoso de dezembro a maio. Em consequência, o volume de água bombeado do rio Parauapebas é muito elevado no período chuvoso e nulo no período de estiagem. Em setembro de 2017, a barragem apresentou o seu menor volume de água disponível. Em 2018, durante o período chuvoso evitou-se bombear da barragem para que fosse estocado água no reservatório a alternativa foi bombear água do rio Parauapebas cujo volume naquele ano foi de 4.359.321,61 m³. Em comparação com a precipitação direta no lago, a vazão afluente contribui com volume mais elevado de água, sendo seus valores maiores no período chuvoso.

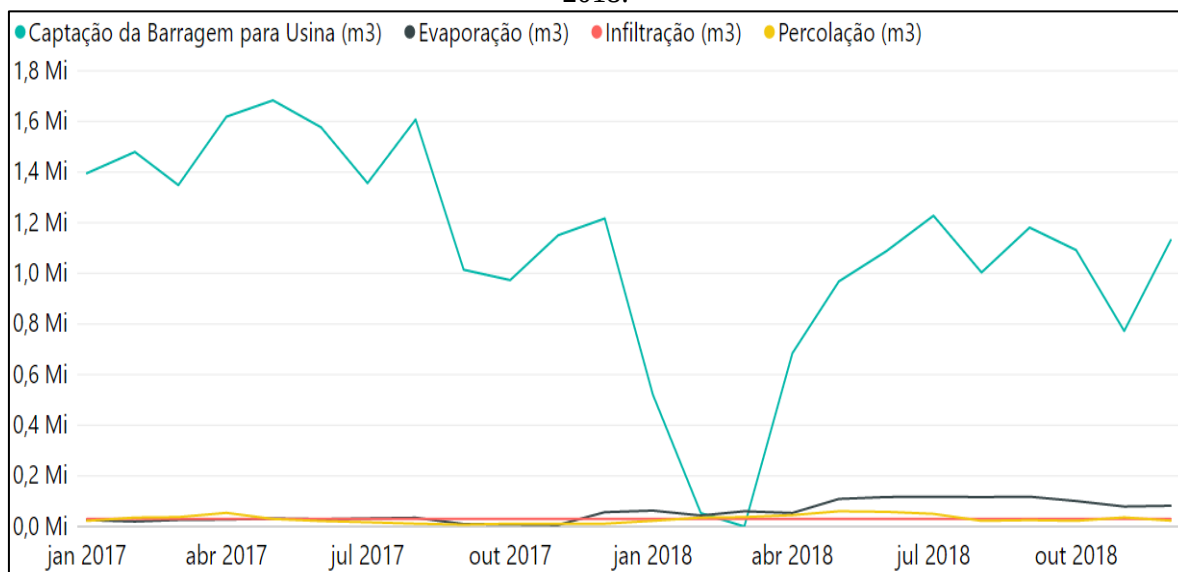
Figura 16 - Variações do volume de entrada de água (em milhões de m³) oriunda de diferentes fontes no reservatório nos anos de 2017 e 2018.



Fonte: Próprio autor, (2019).

Em termos das variáveis de saída da água, a captação de água da barragem para usina de beneficiamento representa maior volume de saída de água, sendo que em 2017 apresentou valores acima de 1.200.000 m³ (Figura 17). As demais variáveis situam-se em patamar muito inferior, com valores geralmente inferiores a 100.000 m³. A evaporação não era medida em dados anteriores a esse estudo, porém é a segunda variável de maior perda, o que evidencia sua importância para o cálculo do balanço hídrico. Das 5 variáveis de saída de água do reservatório, o vertimento é considerado nulo por razões já discutidas.

Figura 17 - Variáveis de saída de água (em milhões de m³) do reservatório nos anos de 2017 e 2018.



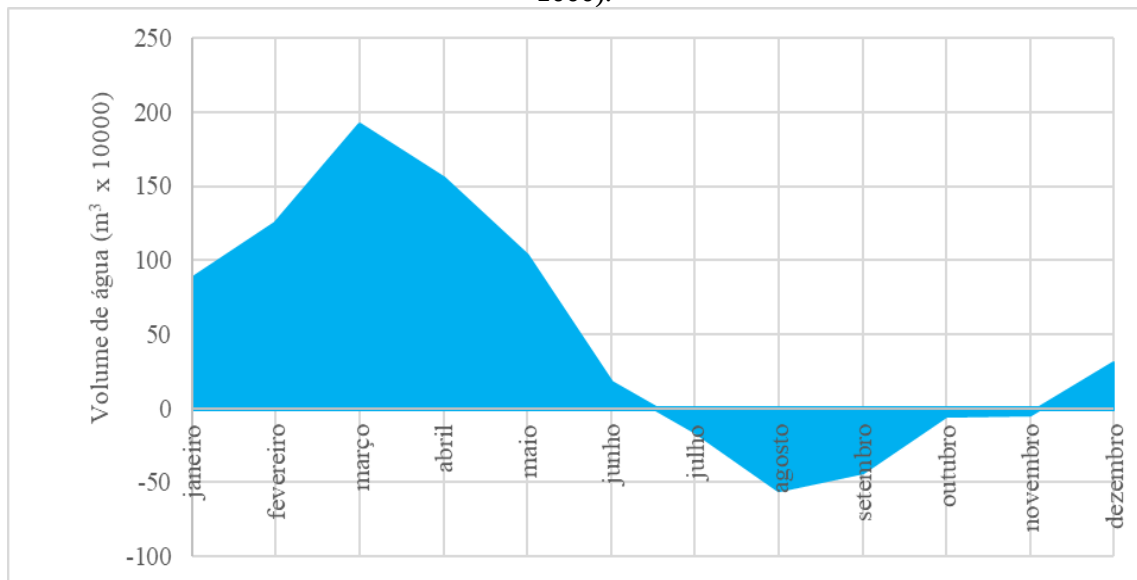
Fonte: Próprio autor, (2019).

Com a consolidação dos dados das variáveis de entrada e de saída de água do reservatório foi possível calcular o balanço hídrico para os anos de 2017 e 2018 (Figuras 17 e 18). Observa-se que durante o período chuvoso a tendência do gráfico apresenta balanço hídrico positivo. Porém no período de estiagem o balanço hídrico é negativo e para manter o equilíbrio hídrico no reservatório foi necessária a utilização do estoque de água acumulado nas cavas da mina durante o período chuvoso, o qual foi bombeado para a barragem no período de estiagem. Além disso, para aumentar as reservas de água acumuladas no lago da barragem, foi indispensável aumentar drasticamente a captação de água do rio Parauapebas durante a estação chuvosa (Figura 16).

A partir de julho de 2017 até novembro de 2017 do mesmo ano a barragem apresentou volumes negativos no balanço hídrico (Figura 18), fato evidenciado na batimetria realizada no início de setembro cujo volume no lago era de pouco mais que 64.187 m³, durante esses cinco meses de 2017 foi realizado bombeamento de água das cavas e reduzido o consumo da usina para não parar o funcionamento da planta de beneficiamento por falta de água. Observa-se que as Figuras 20 e 21 mostram o lago em seu menor volume de água. Durante esse período de menor volume de água, já registrado no reservatório, foi comprometedor nas operações da usina de beneficiamento e se fez necessário a redução da taxa de funcionamento do SAG e com isso reduziu a massa processada em função de pouca água para funcionamento da capacidade máxima da usina. Problemas com bombas na captação de água na barragem também foram apresentados, pois a alta turbidez reduz a eficiência das bombas e compromete

seu funcionamento. Outro fato evidenciado, devido à pouca água disponível, foi a limpeza industrial da usina realizada de forma a seco, sem uso de água.

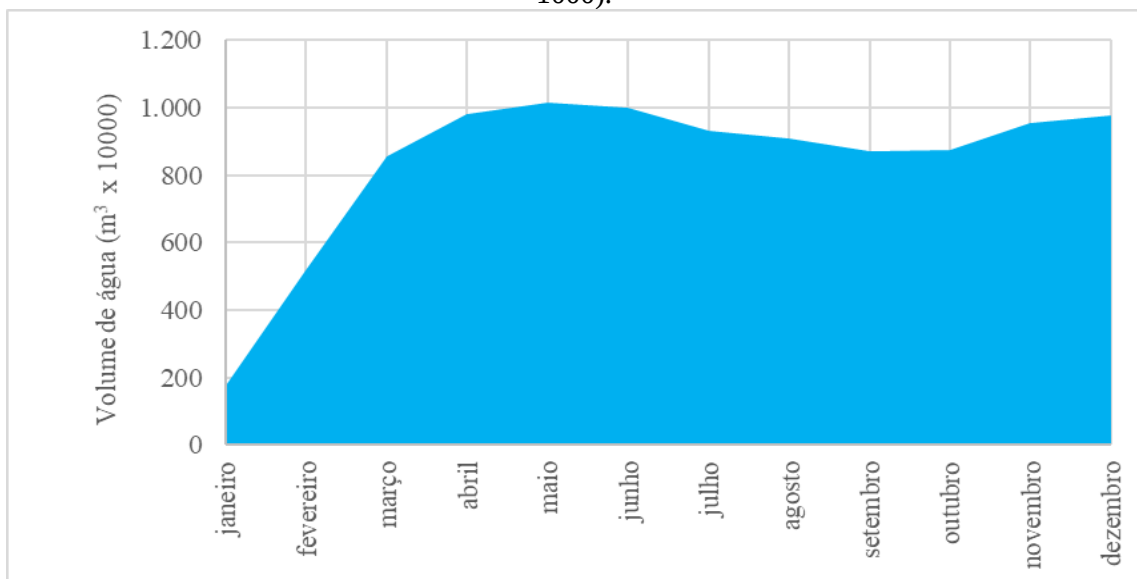
Figura 18: Balanço hídrico da barragem do Sossego no ano de 2017. O volume de água ($\text{m}^3 \times 1000$).



Fonte: Próprio autor, (2019).

Em 2018 com pluviometria maior que 1400 mm apresentada na Figura 5 e com um volume bombeado do rio Parauapebas acima de 4 milhões de metros cúbicos (Tabela 4) frente a 136 mil metros cúbicos de anos anteriores o balanço hídrico foi positivo em todo o ano de 2018 com uma pequena redução do volume de julho a outubro.

Figura 19 - Balanço hídrico da barragem do Sossego no ano de 2018. O volume de água ($\text{m}^3 \times 1000$).



Fonte: Próprio autor, (2019).

Figura 20 - Registro fotográfico do lago principal da barragem datado de 11/07/2017.



Fonte: Próprio autor, (2019).

Figura 21 - Registro fotográfico do lago principal da barragem datado de 11/08/2017.



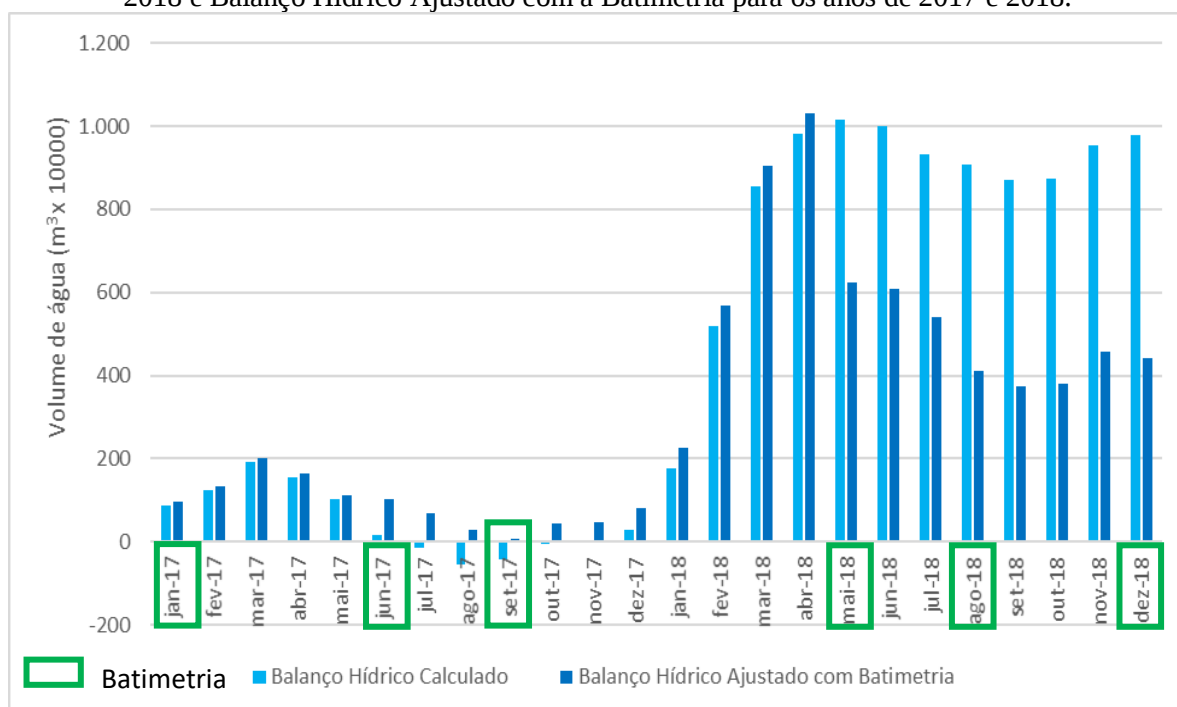
Fonte: Próprio autor, (2019).

O balanço hídrico calculado para os anos 2017 e 2018 e ajustados com as batimetrias realizadas são apresentado na Figura 22. Observa-se que os ajustes são necessários para calibração do balanço hídrico e evitar que o volume disponível no reservatório seja superestimado ou subestimado por consequência das variáveis que não possuem medidas reais dos valores bombeados, dessa forma aumentam as incertezas do balanço hídrico.

Em janeiro de 2017 o balanço hídrico foi ajustado com o volume medido no lago através da batimetria e após essa correção do valor o balanço hídrico apresenta um volume de água disponível no reservatório subestimado em junho e negativo de julho a novembro de 2017, porém através da batimetria realizada em junho do mesmo ano foi observado que o volume de água disponível era significativamente maior do que o calculado no balanço hídrico. Foi realizado em setembro de 2017 uma nova batimetria, observou-se que havia um pequeno volume de água no reservatório (64.187 m³) sendo que pelo balanço hídrico o lago já estaria seco a partir julho de 2017 até novembro de 2017. Diante disso conclui-se que o balanço hídrico subestimou valores no período de julho a novembro de 2017.

Já em 2018 foi possível a realização de batimetria somente em maio, agosto e dezembro e para as três batimetrias quando comparadas com o balanço hídrico que foi realizado, observa-se que o balanço hídrico superestimou o volume de água no reservatório. O que pode explicar tal comportamento é que o volume de água lançado na barragem foi acima de 7 milhões de metros cúbicos e por ser um ano atípico foi bombeado um valor acima de 4 milhões de metros cúbicos do rio Parauapebas, sendo o primeiro caso não há medição através de hidrômetro, ou seja, pode ocorrer vícios nos volumes, já para o segundo caso há medidor instalado na tubulação, por serem volumes bem expressivos nos dois casos podem ter influenciado nos resultados.

Figura 22 - Balanço Hídrico Calculado (m³ x 10000) da barragem do Sossego nos anos de 2017 e 2018 e Balanço Hídrico Ajustado com a Batimetria para os anos de 2017 e 2018.



Fonte: Próprio autor, (2019).

6 CONCLUSÃO

Constatou-se que no ano de 2017 o cálculo do balanço hídrico subestimou para os meses de junho até novembro, fato esse observado quando comparado os dados do balanço hídrico com a medida de batimetria que foi realizada no lago. Em 2018 o cálculo do balanço hídrico foi superestimado para os meses de maio até dezembro fato esse observado nas batimetrias de maio, agosto e dezembro de 2018. Outro ponto importante é instalar medidores de vazão nas tubulações onde é realizado bombeamento das cavas e bombeamento de água da barragem para usina, pois são duas variáveis importantes para o balanço hídrico e se pode continuar considerado hora de painel vezes a vazão nominal das bombas que desconsidera a perda de carga. Verificou-se que o planejamento hídrico é fundamental para garantir o fornecimento estável de água para o pleno funcionamento da mina do Sossego. A extrema variação no aporte de água para o reservatório nas estações chuvosa e seca e a necessidade de suprimento constante de grande volume de água para a planta de processamento da mina torna o balanço hídrico do reservatório frágil, sobretudo em anos de precipitação muito abaixo da média histórica. Caso houver aumento de temperatura e redução de precipitação na região da mina do Sossego em função de mudanças climáticas, esta fragilidade deverá ser acentuada e exigirá planejamento ainda mais rigoroso do uso dos recursos hídricos. Por outro lado, se for feito o devido planejamento, tudo indica que os recursos hídricos disponíveis são suficientes para atender as demandas existentes. É indispensável criar estratégias na rotina operacional da empresa, para controle tanto da captação quanto do lançamento de água na barragem, pois estas variáveis são as de maior influência para o balanço hídrico. Em 2018 a cava do Sequeirinho foi definida para acúmulo de água durante o período chuvoso que chegou a acumular 4 milhões de m³, recomenda-se continuar definindo sempre uma cava para estoque de água. Recomenda-se prosseguir com o balanço hídrico mensal e realizar trimestralmente levantamentos batimétricos no lago para permitir ajustes no cálculo do balanço hídrico. Sugere-se também que seja realizado uma medição direta da evaporação no lago para validar os valores calculados a partir de dados da estação meteorológica, já que esta fica distante 1 km da barragem.

REFERÊNCIAS

- CHAMAS ENGENHARIA. **Acompanhamento técnico das obras do 2º alteamento da barragem de rejeitos da mina do Sossego EL. 243,80-247,80m e diques**: Relatório de consolidação dos dados. Belo Horizonte: CHAMAS Engenharia, 2012. 141 p. (CHM-2184-RT-033)
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage, Paper 56).
- BARBOSA JÚNIOR., A. R. **Elementos de Hidrologia Aplicada**. [S.l.: s.n.], 2002. Disponível em: http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~antenorrodriques/11_introducao.pdf. Acesso em: 26 dez. 2017.
- _____. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **A gestão dos recursos hídricos e a mineração**. Brasília, DF: ANA, 2006. 334 p.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA **Normais Climatológicas: 1961-1990**. Brasília, DF: INMET, 1992. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>.
- BRASIL. MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL (MPF). **Poluição dos recursos hídricos superficiais**. Brasília, DF: GT Águas, 2007.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CIMINELLI, V. S. T.; SALUM, M. J. G.; RUBIO, J.; PERES, A. E. C. Água e Mineração. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA JÚNIOR, B. P. F.; TUNDISI, J. G. (Orgs.). **Águas Doces no Brasil**: capital ecológico, uso e conservação. 3. ed. São Paulo: Escrituras, 2006, p. 433-460.
- COELHO, C. D. **Estimativas da evaporação e da pegada hídrica dos reservatórios das usinas hidrelétricas de Tucuruí-PA e Lajeado-TO**. 2016. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, 2016. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/8347/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. (Coords.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 812 p.
- GARCEZ, L. N. **Hidrologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1974. 249 p.
- GOLDER ASSOCIATES BRASIL CONSULTORIA E PROJETOS. **Elaboração de estudos e projetos conceituais para compatibilização do novo plano diretor de**

disposição de estêreis com o plano diretor de drenagem superficial, na mina do Sossego. Canaã dos Carajás/PA: [s.n.], 2008. (Relatório final. RT-002_089-515-4012_02-J; junho de 2008).

_____. **Caracterização hidrogeológica.** [S.l.: s.n.], 2001. (Relatório RT-PR-CT047-MI-1000-93-0001-00-J).

_____. **Projeto sossego, fase de viabilidade barragem de rejeitos.** Rio de Janeiro: [s.n.], 2001. (Documento nº 5126-500-001-RE-003; maio de 2001).

HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 14, n. 1, p. 446-460, jun. 1933. DOI <https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446>.

HOULSB, A. C. Routine interpretation of the Lugeon water-test. **Q. Jl Engng Geol.** v. 9, p. 303-313, 1976.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração.** Brasília, DF: IBRAM, 2016.

KOHLER, M. A.; NORDENSEN, T. J.; FOX, W. E. **Evaporation from pans and lakes**, U.S. Weather Bureau Research, 1995. 21 p. (Paper 38).

KRUEGER, C. P.; VEIGA, L. A. K.; FAGGION, P. L. Levantamento batimétrico no Rio Uruguai. In: XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, 1., Belo Horizonte, 2003. **Anais...** Rio de Janeiro: SBC, 2003. p. 1-5.

LANNA, A. E. L. **Gerenciamento da bacia hidrográfica: aspectos conceituais e metodológicos.** Brasília, DF: IBAMA, 1995.

LEITÃO, M. de M. V. B. R.; OLIVEIRA, G. M. de, LEITÃO, T. J. V. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da Paraíba. **Revista Brasileira de engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 585-593, 2007.

LINACRE, E. T. Data-sparse estimation of lake evaporation using a simplified Penman equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 64, p. 237-256, 1993.

MARTINS, J. A. Escoamento Superficial. In: PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A. **Hidrologia de superfície**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1973. p. 36-43. (Capítulo 3)

MORTON, F. I. Operational estimates of areal evaporation and their significance to the science and practice of hydrology. **Journal of hydrology**, v. 66, p. 1-76, 1983a.

MORAES, B. C.; COSTA, J. M. N.; COSTA, A. C. L.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 207-214, 2005.

NANKRAN, M.; BERGERMAN, M.; MIRANDA, A.; OLIVEIRA, J.; SOUZA, M.; BATISTA FILHO, J.; CARDOSO, W. Controle operacional da usina do Sossego. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS, 22., Ouro Preto, nov. 2007.

PASSOS, N. C. S. T. **Barragem de Rejeito: Avaliação dos Parâmetros Geotécnicos de Rejeito de Minério de Ferro utilizando Ensaios de Campos—Um Estudo de Caso.** 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology Earth Systems Science**, v. 11, p. 1633-1644, 2007.

Penman, H. L. "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." **Proc. Roy. Soc. London**, A193, p. 120-146. 1948

PEREIRA, S. B. **Evaporação no lago de Sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco.** 2004. 102 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/9701/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 346-352, 2009.

REIS, R. J.; DIAS, N. L. Multi-season lake evaporation: energy-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations. **Journal of Hydrology**, v. 208, n. 3, p. 135-14, 1998.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos.** São Carlos: EESC/USP, 1998.

RODRIGUES, L. N. *et al.* Equação para estimativa da evaporação de água em pequenas barragens com base no tanque classe “A”. In: Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, 10; Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 41., Londrina, 2012. **Anais....** Londrina: CLIA/CONBEA, 2012.

SILVA JÚNIOR, R. O.; QUEIROZ, J. C. B.; FERREIRA, D. B. S.; TAVARES, A. L.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; GUIMARÃES, J. T. F.; ROCHA, E. J. P. Estimation of precipitation and average flows for the Itacaiúnas River basin (IRB), Eastern Amazonia, Brazil. **Rev. Bras. Geogr. Fís.** v. 10, n. 5, p. 1638-1654. 2017.

SILVA, S. A. **Avaliação do assoreamento do Lago Bonsucesso, Jataí – GO.** 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento.** São Paulo: Oficina de textos, 2006. 416 p.

SOUZA, J. L. M.; GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, n. 2, p. 153-163, 2008.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre, RS: UFRGS/ABRH, 1993. 943 p.

_____. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3. ed. Porto Alegre, RS: UFRGS/ABRH, 2002. 943 p.

_____. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre, RS: UFRGS/ABRH, 2007.

WALM ENGENHARIA. **FEL2 – Projeto conceitual: Estudo de vida útil da barragem do Sossego**. [S.l.: s.n.], 2019. (Relatório técnico RL-5280SS-X-07055). 80 p.

VALE, **Relatório de Batimetria na Barragem da mina do Sossego**. Diretoria do Cobre Hub Sul, revisão 00, 2017.

VALE, **Relatório Geotécnico e Hidrogeológico da mina do Sossego**. Diretoria do Cobre Hub Sul, revisão 00, 2018.

VIEIRA, N. P. A. **Estimativa da evaporação nos reservatórios de Três Marias – MG e Sobradinho - BA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 82 p., 2015.

VIEIRA, N. P. A. *et al.* **Estimativa da evaporação nos reservatórios de Sobradinho e três Marias usando diferentes modelos**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 36, n.3, p. 433-448, maio/junho. 2016.

ANEXOS

ANEXO A – GRÁFICO DE VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA.

	VARIÁVEIS DE ENTRADA															Total
Mês/Ano	Volume total lançado na barragem (m³)	Vazão lançado na barragem (m³)	Volume Bombeado das Cavas (m³)	Volume Bombeado do Rio (m³)	Precipitação (mm/mês)	Precipitação (m/mês) = mm/1.000	Intensidade de Precipitação (mm/h) (i)	Área do Lago (km²)	Área do Lago (m²)	Área do reservatório menos o Lago (km²)	Volume de Precipitação direta no lago (m³/mês) = Área do Lago (m²)	Coefficiente de Escoamento (C)	Volume da Vazão Afluente (m³/s)	Volume da Vazão Afluente (m³/mês)	Total precipitação (m³/mês) [direta + Vol. Afluente]	Total de Entradas (m³)
jan/17	1395394,00	711650,94	100481,00	15650,00	100,90	0,10	0,14	0,33	325000,00	8,41	32792,50	0,55	0,18	482368,91	515161,41	1342943,35
fev/17	1479517,00	754553,67	202548,00	13000,00	207,76	0,21	0,29	0,33	325000,00	8,41	67522,00	0,55	0,37	897111,49	964633,49	1934735,16
mar/17	1348499,00	687734,49	268667,00	15700,00	223,26	0,22	0,31	0,33	325000,00	8,41	72559,50	0,55	0,40	1067330,85	1139890,35	2111991,84
abr/17	1618703,00	825538,53	200340,00	16450,00	64,85	0,06	0,09	0,33	325000,00	8,41	21076,25	0,55	0,12	300025,17	321101,42	1363429,95
mai/17	1683375,00	858521,25	130075,00	43750,00	43,75	0,04	0,06	0,33	325000,00	8,41	14218,75	0,55	0,08	209154,01	223372,76	1255719,01
jun/17	1245802,00	635359,02	96103,00	15900,00	11,41	0,01	0,02	0,31	310000,00	8,42	3537,10	0,55	0,02	52881,98	56419,08	803781,10
jul/17	1356408,00	691768,08	381581,00	15700,00	5,22	0,01	0,01	0,31	310000,00	8,42	1618,20	0,55	0,01	24999,60	26617,80	1115666,88
ago/17	1607457,00	819803,07	396948,00	0,00	12,71	0,01	0,02	0,31	310000,00	8,42	3940,10	0,55	0,02	60870,67	64810,77	1281561,84
set/17	1014300,00	517293,00	633775,00	0,00	5,94	0,01	0,01	0,09	89800,00	8,64	533,41	0,55	0,01	28250,12	28783,53	1179851,53
out/17	973198,00	496330,98	600608,00	0,00	62,15	0,06	0,09	0,09	90000,00	8,64	5593,50	0,55	0,11	305425,51	311019,01	1407957,99
nov/17	1150651,00	586832,01	291021,00	0,00	68,30	0,07	0,09	0,09	90000,00	8,64	6147,00	0,55	0,13	324821,25	330968,25	1208821,26
dez/17	1216725,00	620529,75	390605,00	0,00	120,23	0,12	0,17	0,84	840000,00	7,89	100993,20	0,55	0,20	539560,66	640553,86	1651688,61
jan/18	1301324,08	663675,28	55800,00	780017,00	113,31	0,11	0,16	0,84	840000,00	7,89	95180,40	0,55	0,19	508505,52	603685,92	2103178,20
fev/18	1288447,48	657108,21	86399,00	1235398,00	324,64	0,32	0,45	0,84	840000,00	7,89	272697,60	0,55	0,54	1315908,81	1588606,41	3567511,63
mar/18	1277697,00	651625,47	64800,00	1471704,00	249,33	0,25	0,35	0,84	840000,00	7,89	209437,20	0,55	0,42	1118927,55	1328364,75	3516494,22
abr/18	1138393,74	580580,81	277401,00	453904,00	145,62	0,15	0,20	0,84	840000,00	7,89	122320,80	0,55	0,24	632423,52	754744,32	2066630,13
mai/18	1239273,36	632029,41	361105,00	270916,00	45,48	0,05	0,06	1,28	1280000,00	7,45	58214,40	0,55	0,07	192720,16	250934,56	1514984,98
jun/18	1089374,00	555580,74	505177,00	15630,00	11,66	0,01	0,02	1,28	1280000,00	7,45	14924,80	0,55	0,02	47815,07	62739,87	1139127,61
jul/18	1227673,32	626113,39	89300,00	10618,00	1,30	0,00	0,00	1,28	1280000,00	7,45	1664,00	0,55	0,00	5508,71	7172,71	733204,10
ago/18	1000795,98	510405,95	169000,00	0,00	45,64	0,05	0,06	1,19	1190000,00	7,54	54311,60	0,55	0,07	195734,51	250046,11	929452,06
set/18	1177902,01	600730,03	99000,00	0,00	50,30	0,05	0,07	1,19	1190000,00	7,54	59857,00	0,55	0,08	208760,98	268617,98	968348,00
out/18	1088825,00	555300,75	136400,00	0,00	111,91	0,11	0,16	1,19	1190000,00	7,54	133172,90	0,55	0,18	479944,11	613117,01	1304817,76
nov/18	776491,00	396010,41	213500,00	7181,00	204,45	0,20	0,28	1,19	1190000,00	7,54	243295,50	0,55	0,33	848532,43	1091827,93	1708519,34
dez/18	1127978,64	575269,11	173000,00	113954,00	117,62	0,12	0,16	1,15	1151500,00	7,58	135439,43	0,55	0,19	507008,05	642447,48	1504670,59

Continuação...

	VARIÁVEIS DE SAÍDA								Total
Mês/Ano	Evaporação (mm/mês)	Evaporação (m ³ /mês)	Infiltração (m ³)	Leitura da Vazão na Calha Parshall do dreno de Fundo (m3/h)	Horas por Dia	Dias no Mês	Percolaçã o (m ³)	Captação da Barragem para Usina (m ³)	Total de Saídas (m ³)
jan/17	77,68	25246,08	30000,00	30,00	24	31	22320,00	1395393,00	1472959,08
fev/17	60,58	19688,37	30000,00	52,50	24	28	35280,00	1479516,50	1564484,87
mar/17	79,97	25990,68	30000,00	50,00	24	31	37200,00	1348489,00	1441679,68
abr/17	84,54	27475,58	30000,00	75,00	24	30	54000,00	1618702,00	1730177,58
mai/17	96,61	31397,74	30000,00	40,00	24	31	29760,00	1683375,00	1774532,74
jun/17	93,13	28868,96	30000,00	30,00	24	30	21600,00	1576978,00	1657446,96
jul/17	102,54	31785,97	30000,00	22,50	24	31	16740,00	1356407,00	1434932,97
ago/17	111,50	34564,87	30000,00	15,00	24	31	11160,00	1607457,00	1683181,87
set/17	107,60	9662,75	30000,00	10,00	24	30	7200,00	1014300,11	1061162,86
out/17	91,24	8211,68	30000,00	15,00	24	31	11160,00	973197,91	1022569,59
nov/17	68,96	6205,95	30000,00	15,00	24	30	10800,00	1150651,00	1197656,95
dez/17	67,44	56646,99	30000,00	15,00	24	31	11160,00	1216725,42	1314532,41
jan/18	74,77	62806,93	30000,00	30,00	24	31	22320,00	521307,08	636434,01
fev/18	51,66	43398,29	30000,00	52,50	24	28	35280,00	53049,48	161727,77
mar/18	71,76	60275,70	30000,00	50,00	24	31	37200,00	0,00	127475,70
abr/18	63,72	53526,31	30000,00	62,50	24	30	45000,00	684489,74	813016,05
mai/18	85,08	108904,42	30000,00	81,00	24	31	60264,00	968357,04	1167525,46
jun/18	91,01	116492,45	30000,00	80,54	24	30	57988,80	1089374,00	1293855,25
jul/18	91,90	117631,34	30000,00	67,21	24	31	50004,24	1227673,32	1425308,90
ago/18	97,68	116244,27	30000,00	30,00	24	31	22320,00	1003598,77	1172163,04
set/18	98,97	117768,93	30000,00	35,00	24	30	25200,00	1180870,23	1353839,16
out/18	84,51	100571,30	30000,00	30,00	24	31	22320,00	1091850,63	1244741,93
nov/18	66,33	78938,50	30000,00	50,00	24	30	36000,00	772334,04	917272,54
dez/18	71,18	81958,53	30000,00	31,00	24	31	23064,00	1131080,19	1266102,72

ANEXO B - GRÁFICO DA VARIÁVEL EVAPORAÇÃO.

		T média Mensal (°C)	P - Precipitação Mensal (mm)	Pm - Precipitação Média Mensal (mm)	UR (%)	Log de Pm	[Log de Pm] ²	Cm - Nuvens que ocupam	Ra-Radiação Extraterrestre [média mensal] (W/m ²)	Rs-Irradiação Solar na Sup. Do Lago(W/m ²)	h - Altitude do local (m)	F - Fator de correção	u ₂ - Vel. Vento [média mensal]	Td - T Méd. Mensal do Ponto	Er - Evaporação da água no lago (mm/dia)	Er - Evaporação da água no lago (mm/mês)
2017	Jan	25,22	100,90	3,25	82,20	0,51	0,26	1,53	200,38	155,92	216,00	0,98	1,64	22,15	2,51	77,68
	Fev	24,90	207,76	7,42	84,27	0,87	0,76	2,21	189,19	141,16	216,00	0,98	1,56	21,94	2,16	60,58
	Mar	25,23	223,26	7,20	84,16	0,86	0,74	2,18	214,65	160,45	216,00	0,98	1,57	22,22	2,58	79,97
	Abr	25,62	64,85	2,16	84,14	0,33	0,11	1,29	216,69	171,09	216,00	0,98	1,55	22,57	2,82	84,54
	Mai	26,36	43,75	1,41	79,28	0,15	0,02	1,10	225,86	180,30	216,00	0,98	1,76	23,05	3,12	96,61
	Jun	25,40	11,41	0,38	72,55	-0,42	0,18	0,96	224,37	180,61	216,00	0,98	1,83	21,96	3,10	93,13
	Jul	25,22	5,22	0,17	60,89	-0,77	0,60	1,20	233,58	185,41	216,00	0,98	2,08	21,33	3,31	102,54
	Ago	27,97	12,70	0,41	59,85	-0,39	0,15	0,95	234,57	188,93	216,00	0,98	2,08	23,61	3,60	111,50
	Set	28,41	5,40	0,18	55,64	-0,74	0,55	1,17	230,97	183,65	216,00	0,98	2,21	23,76	3,59	107,60
	Out	28,06	62,15	2,00	65,74	0,30	0,09	1,25	200,93	159,00	216,00	0,98	2,17	23,96	2,94	91,24
	Nov	26,06	68,10	2,27	78,02	0,36	0,13	1,31	179,99	141,89	216,00	0,98	1,76	22,74	2,30	68,96
	Dez	25,51	120,23	3,88	79,84	0,59	0,35	1,65	177,99	137,47	216,00	0,98	1,78	22,32	2,18	67,44
2018	Jan	25,25	113,31	3,66	80,46	0,56	0,32	1,61	193,46	149,81	216,00	0,98	1,76	22,11	2,41	74,77
	Fev	24,32	324,64	10,47	85,62	1,02	1,04	2,57	173,18	126,28	216,00	0,98	1,65	21,47	1,85	51,66
	Mar	24,95	249,33	8,04	83,93	0,91	0,82	2,29	198,57	147,41	216,00	0,98	1,66	21,97	2,31	71,76
	Abr	24,98	145,62	4,70	84,08	0,67	0,45	1,80	181,93	139,24	216,00	0,98	1,54	22,00	2,12	63,72
	Mai	25,66	45,48	1,47	77,69	0,17	0,03	1,11	205,87	164,21	216,00	0,98	1,77	22,37	2,74	85,08
	Jun	25,34	11,66	0,38	69,18	-0,42	0,18	0,96	220,18	177,22	216,00	0,98	1,78	21,78	3,03	91,01
	Jul	26,18	1,30	0,04	60,81	-1,38	1,90	2,18	224,38	167,72	216,00	0,98	1,91	22,14	2,96	91,90
	Ago	26,87	45,64	1,47	65,96	0,17	0,03	1,12	219,56	175,11	216,00	0,98	1,96	22,96	3,15	97,68
	Set	27,03	50,30	1,62	69,84	0,21	0,04	1,15	229,97	183,01	216,00	0,98	1,92	23,26	3,30	98,97
	Out	26,52	111,91	3,61	75,52	0,56	0,31	1,60	207,09	160,45	216,00	0,98	1,77	23,04	2,73	84,51
	Nov	25,66	204,45	6,60	81,61	0,82	0,67	2,10	185,33	139,26	216,00	0,98	1,77	22,51	2,21	66,33
	Dez	25,40	117,62	3,79	79,56	0,58	0,34	1,64	186,63	144,28	216,00	0,98	1,70	22,22	2,30	71,18