UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

PEDRO HENRIQUE VOGT SILVEIRA

Lagos de mina: alternativa para abastecimento público?

São Paulo
2019

PEDRO HENRIQUE VOGT SILVEIRA

LAGOS DE MINA: ALTERNATIVA PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO?

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se na unidade que aloja o Programa de Pós-Graduação)

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Giorgio Francesco Cesare de Tomi

São Paulo
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

SILVEIRA, PEDRO HENRIQUE VOGT
LAGOS DE MINA: ALTERNATIVA PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO? /
P. H. V. SILVEIRA -- versão corr. -- São Paulo, 2019.
50 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.RECURSOS HÍDRICOS (DEFICIÊNCIA) 2.REABILITAÇÃO DE ÁREAS (OTIMIZAÇÃO) 3.LAGOS (APROVEITAMENTO; USO) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

Nome: SILVEIRA, Pedro Henrique Vogt

Título: Lagos de mina: alternativa para abastecimento público?

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: ____ / ____ / ____

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

PEDRO HENRIQUE VOGT SILVEIRA

LAGOS DE MINA: ALTERNATIVA PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO?

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se na unidade que aloja o Programa de Pós-Graduação)

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Giorgio Francesco Cesare de Tomi

São Paulo
2019

A meus pais que sempre me incentivaram a alçar voos cada vez maiores,
A minha irmã e minha sobrinha Cecília que incentivo aos mesmos caminhos,
A minha noiva que esteve presente e apoiou incansavelmente com seu carinho,
A minha família e amigos que entenderam a ausência e me apoiaram desde o início,
A minha avó que sempre foi resiliente, carinhosa e presente nas etapas de pesquisa.

AGRADECIMENTOS

A minha noiva Ana Carolina, que além de realizar seu próprio mestrado, participou assiduamente no início das pesquisas e motivou meus estudos.

Aos meus pais e minha avó, que motivaram e se fizeram presentes acompanhando diversas etapas dessa pesquisa.

Ao meu amigo Marcell Besser e família, que sempre me propiciaram incansáveis conversas a respeito do conhecimento, além de me apoiar incansavelmente neste trabalho.

Aos meus amigos Luis Galiano, Virgínia Maciel e José Bazille, pela companhia e participação de etapas muito importantes na pesquisa.

Aos meus amigos José Augusto e Mariane, pelo apoio e incentivo.

Ao meu amigo Rodrigo Cordova, por seus contínuos ensinamentos.

Ao Dr. Kaminski e família, pelas prosas alegres e queridas que tivemos a respeito.

Ao professor Dr. Giorgio Francesco Cesare de Tomi, pela atenção, apoio e orientação.

As professoras Dras. Ana Carolina Chieregati e Carina Ulsen, pelo incentivo e apoio.

Aos colegas da USP que tanto me auxiliaram em diversas etapas desse trabalho, em especial ao Carlos e Raniere que me apoiaram diversas vezes em São Paulo.

Aos colegas da Votorantim Cimentos que me apoiaram na fase inicial do projeto, em especial ao Renato Sinischalchi, Helio Fábio, Ana Laura, Lucas e Bruno.

Aos colegas da Gerência de Hidrogeologia, Gerência de Avaliação de Conformidades, da Gerência de Recursos Hídricos e da Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), que apoiaram e compartilharam a infraestrutura necessária para a pesquisa, além de enriquecer meu ponto de vista em diversas áreas com seus conhecimentos.

As empresas e instituições públicas e privadas que contribuíram de alguma forma pelo sucesso dessa pesquisa.

E finalmente, a Universidade de São Paulo e a Escola Politécnica, as quais me orgulham de fazer parte e de carregar seus nomes.

“Enquanto o poço não seca,
não sabemos dar valor à água.”

Thomas Fuller

Esta pesquisa foi agraciada, na data de 17 de dezembro de 2018, pela premiação de 1º lugar na categoria “Lavra a céu aberto” do “1º Concurso de Projetos de Destinação de Áreas Mineradas para Utilização Econômica e Social”, promovido pela Secretaria de Energia e Mineração do Estado de São Paulo, em parceria com a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP).

RESUMO

SILVEIRA, P. H. V.. **Lagos de mina: alternativa para abastecimento público?** 2019. 50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

Eventos climáticos localizados e fora dos padrões, que promovam longos períodos de estiagem, podem acarretar impactantes crises hídricas em sistemas de abastecimento de água saturados ou próximos dos limites de operação. A necessidade de projetos sustentáveis de longo prazo é eminente, porém soluções emergenciais são necessárias para superar esses períodos. Municípios onde a atividade mineira é atuante podem esperar ao findar das suas operações a formação de cenários atípicos em sua paisagem, como grandes bacias resultantes da remoção do minério. Essas bacias podem ter destinos nobres para a sociedade se o lençol freático estiver aflorante, não apenas como função paisagística, uma vez que concentram volumes consideráveis de água. Os lagos de minas formados podem oferecer a possibilidade de captação de água para potabilidade em períodos de crises hídricas. Este trabalho apresenta volumes expressivos na modelagem matemática de corpos hídricos, estimada pelo nível do lençol freático de poços tubulares profundos, na Região metropolitana de São Paulo, em cenários atuais e possíveis de minerações ativas ou finalizadas.

Palavras-chave: Lagos de Mina; Descomissionamento de Mina; Reservação de Água.

ABSTRACT

SILVEIRA, P. H. V.. **Mine lakes: alternative for public supply?** 2019. 50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019

Localized and non-standard climate events that promote long periods of drought can lead to impact water crises in saturated water supply systems or close to operating limits. The need for sustainable long-term projects is imminent, but emergency solutions are needed to overcome these periods. Cities where mining activity is active can expect at the end of their operations the formation of atypical scenarios in their landscape, such as end-pit mines resulting from the removal of ore. These basins may have noble destinations for society if the groundwater surface is outcropped, not only as a landscape function, since they concentrate considerable volumes of water. The lakes formed mines can offer the possibility of abstraction of water for potability in periods of water crises. This work presents significant volumes in the mathematical modeling of water bodies, estimated by the level of the groundwater table obtained by deep tubular wells, in the metropolitan region of São Paulo, in current and possible scenarios of active or finished mining.

Keywords: mine lake; end-*pit* mines; water reservation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Esquema do Sistema Cantareira.	17
Figura 2 –	Dados hidrológicos do período de outubro de 2013 a outubro de 2014.	18
Figura 3 –	Esquema de etapas e relações dos processos para obtenção da estimativa de capacidade de reservação de água de lagos de mina.	24
Figura 4 –	Evolução da lavra e enchimento da mina nº 30 (Unidade de Arujá, Votorantim Cimentos S.A.).	28
Figura 5 –	Comparação entre imagem aérea atual, desenho do pit atual e do pit final da mina nº 19 (Unidade Barueri, Lafarge do Brasil S.A.).	29
Figura 6 –	Imagem aérea, volume atual, capacidade real e final da mina nº 12 (Unidade Cajamar, Votorantim Cimentos). Nível estático atual estimado está à apenas três metros da estabilidade.	30
Figura 7 –	Lago 05: Pedreira Anhanguera, Imagem aérea atual, desenho do pit atual e situação do pit atual (inundado). Abaixo o pit final seco e inundado até o nível estático estável.	30
Figura 8 –	Modelo de blocos do sistema Lagos Sul, estimativa de recursos futuros.	39
Figura 9 –	Imagem aérea de Lagos Sul.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade de Reservação de Água e Tamanho da Ocupação de Lagos de Mina na RMSP.	32
Tabela 2 – Classificação de reservatórios quanto volume.	34
Tabela 3 – Características de volume dos Mananciais da RMSP em ordem decrescente de Capacidade Real.	35
Tabela 4 – Volumes dos lagos estimados por região em ordem decrescente da Capacidade Possível.	35

LISTA DE ABREVIACÕES

ANA	Agência Nacional das Águas
ANM	Agência Nacional de Mineração
ASTERWEB	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
BDGEx	Banco de Dados Geográficos do Exército
CHESS	Crise Hídrica, Estratégia e Soluções da SABESP
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DATAGEO	Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EC	European Commission
ETA	Estação de Tratamento de Água
FABHAT	Fundação da Agência da Bacia do Alto Tietê
GEOSAMPA	Mapa Digital da Cidade de São Paulo
HIDROWEB	Sistema de Informações Hidrológicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGC-UFMG	Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais
MINEROPAR	Minerais do Paraná S.A.
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIM	Sistema Integrado Municipal
TAC	Termo de Ajuste de Conduta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	JUSTIFICATIVA.....	14
3	OBJETIVO	15
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
4.1	Crise Hídrica.....	16
4.2	Lagos de Minas	18
4.3	Potencialidade	21
5	MATERIAIS E MÉTODOS	24
5.1	Áreas de Estudo	25
5.2	Banco de Dados	25
5.3	Nível Estático.....	26
5.4	Capacidade de Reservação	27
5.4.1	Topografia	27
5.4.2	Desenho dos Pits	27
5.4.3	Estimativa dos Volumes	29
6	RESULTADOS.....	31
7	DISCUSSÕES.....	34
7.1	Volume Existente.....	36
7.2	Capacidade Real	37
7.3	Capacidade Possível.....	38
8	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

APÊNDICE 1 – Mapa de localização dos lagos de minas da RMSP**Erro! Indicador não definido.**

APÊNDICE 2 – Mapa de nível estático da RMSP..... **Erro! Indicador não definido.**

1 INTRODUÇÃO

Ao findar de uma fase longa e rentável da mineração, a operação e, o depósito mineral estar exaurido, não se encerra a atividade mineira, pelo contrário, inicia-se uma nova fase de investimentos para eliminar passivos ambientais e sociais que a atividade causou. É chegada a hora do descomissionamento de mina. Se bem planejada, muitas atividades ao longo da vida-útil da mina já são realizadas para diminuir seu custo, tais como a alocação correta do depósito de estéril, o cuidado diário com os ângulos de taludes do *pit* (cava, mina) e a destinação final do material contaminante, quando houver. No entanto, e aquele “buraco” que não estava ali?

O impacto visual causado pelo *pit* final ou cava, nomes dados tecnicamente para a configuração da topografia que a atividade mineira estabeleceu, ou ainda, o “buraco”, popularmente chamado, muitas vezes é agressivo aos olhos da sociedade, principalmente quando se dá em regiões densamente povoadas e a população convive diariamente no ambiente. Em diversos locais do país em que a lavra foi encerrada, houve total abandono dessas áreas por parte de algumas empresas, acarretando em passivos ambientais ou áreas de risco para a população. As cavas são utilizadas como áreas de descarte de lixo, que podem contaminar o lençol freático, áreas de criminalização em função do abandono e, quando apresentam lençol freático aflorante, também são utilizadas para recreação sem os devidos cuidados, podendo resultar até na morte por afogamento dos usuários.

Por outro lado, essas áreas também recebem destinações ótimas de acordo com suas características, desde estacionamentos de shoppings construídos aproveitando a geometria, aterros sanitários que objetivam a retomada da topografia original, e ainda, quando preenchidas por água, formando os chamados lagos de minas, são transformadas em parques, condomínios domiciliares e empresariais, pesque-e-pague, pontos turísticos, hotéis e até universidades, ou ainda, o recurso hídrico é utilizado para diversos fins.

E se pudéssemos utilizar esse recurso hídrico para fins de abastecimento público? Teriam os lagos de minas volumes expressivos para serem captados? A qualidade dessa água estaria comprometida pela atividade mineira ou teria padrões de qualidade de água ideais para serem tratadas e distribuídas à população?

O presente trabalho busca verificar a potencialidade no uso de lavras a céu aberto quanto aos seus volumes, que podem contemplar no seu planejamento a destinação de reservação de água. O intuito é verificar se essa reservação pode suprir demandas emergenciais em crises hídricas.

Outra intenção é chamar a atenção de mineradores, gestores e líderes de corporações envolvidas com atividades mineiras que podem enxergar no fim da atividade de lavra um negócio rentável com os lagos de minas, além de empresas de saneamento que podem gerir seus recursos e projetar suas obras de ampliação a fim de captar essas possíveis reservas de água, ou ainda, da própria sociedade que encara a mineração geralmente de forma negativa mas pode vislumbrar nela uma solução para a falta de um recurso tão necessário, a água.

Diante do exposto, a pesquisa visa contribuir com mais uma opção de reservação de água para ser utilizada em crises hídricas, além de mais uma opção de destinação de áreas de lavra a céu aberto. O estudo contemplou a RMSP pois a mesma apresenta demandas para soluções de problemas de abastecimento público e conta ainda com um número grande de áreas de lavra a céu aberto que podem contribuir para essa finalidade.

2 JUSTIFICATIVA

Em regiões onde longos ou intensos regimes de estiagem favorecem a redução drástica das vazões dos rios e, conseqüentemente, o volume de água retido nos reservatórios de captação, além de processos de evaporação em grandes superfícies serem acelerados, soluções de reservação de água localizada podem atenuar ou até mesmo suprir a demanda até o retorno de períodos de chuva.

A cidade de São Paulo, assim como sua Região Metropolitana (RMSP), vivenciou no final do ano de 2013 e início de 2014 uma enorme estiagem, o que acarretou na falta de água para abastecimento público em diversos locais, além de tornar necessárias medidas de gestão dos mananciais que abastecem a região.

A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), sociedade anônima de econômica mista, responsável pelo abastecimento de água da RMSP, frente à criticidade da situação, adotou diversas estratégias como redução da captação dos mananciais e redução do consumo por meio de rodízios, para dessa forma, garantir o abastecimento da população de forma precária. Uma dessas estratégias foi o planejamento na construção de represas e sistemas de reservação de água, a fim de garantir durante longos períodos as possíveis estiagens que a região possa sofrer novamente no futuro.

A fim de atenuar dois grandes problemas atuais e futuros, a falta de água e a destinação de *pits* exauridos, o presente trabalho expõe como uma alternativa de uso para *pits* em fase de descomissionamento de mina ou até mesmo encerrados, sua aplicação como reservatórios de água para atenderem a demanda de captação para abastecimento público em períodos de estiagem.

Contudo, as características físicas dessas lavras a céu aberto devem ser avaliadas, ou seja, se as mesmas contemplam um volume expressivo e comparável com represas e sistemas de captação de água para abastecimento público. Quanto a locação dessas estruturas, é importante avaliar a questão de captação e distribuição, ou seja, a implantação da rede de adutoras necessárias para ligar o reservatório, a estação de tratamento e a distribuição, no entanto, não é alvo dessa pesquisa pois é intrínseca a cada empreendimento.

3 OBJETIVO

O trabalho apresenta uma alternativa de uso para *pit* em fase de descomissionamento de mina. Será avaliada sua aplicação como reservatório de água para atender à demanda de captação para abastecimento público em períodos de estiagem.

A fim de atender o objetivo proposto, o trabalho busca quantificar o volume de reservação para os *pits* inseridos na Região Metropolitana de São Paulo quanto ao volume existente (configuração atual da mina), a capacidade real (nível estático do lençol freático estável na configuração atual da mina) e a capacidade possível de reservação (projeção final da cava com nível estático estável), baseado na topografia original e nas cavas desenhadas segundo as Normas Reguladoras da Mineração (NRM) (BRASIL, 2001) e, no nível estático regional obtido por interpolação de poços tubulares profundos. Por fim, poder comparar os dados obtidos com reservatórios tradicionalmente utilizados para consumo humano a fim de atestar se o volume é expressivo para atender a demanda.

As diversas operações de lavras a céu aberto existentes possuem características heterogêneas quanto ao seu *pit* final (lavra em cavas ou encostas, ou ainda, bermas e taludes de dimensões diferentes) tal como em relação ao lençol freático (pode variar bruscamente em cada localidade) e, nesse sentido, este trabalho objetiva tratar de forma abrangente essas características, de forma a estimar a reservação da forma mais fiel possível.

Como objetivo geral, busca apontar não somente uma alternativa, mas também incentivar novas pesquisas e servir de apoio para empresas e órgãos públicos que vislumbrarem nessas atividades fins mais nobres que apenas um “buraco” em meio ao cenário.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica trata de forma organizada os seguintes assuntos: crise hídrica (a justificativa do trabalho), lagos de mina (um apanhado do que está sendo estudado no mundo inteiro a respeito) e, por fim, a potencialidade dos lagos de minas (a capacidade de reservação de água dos lagos de minas na RMSP).

4.1 Crise Hídrica

A RMSP é abastecida em grande parte pelo Sistema Integrado Metropolitano (SIM), que abastece cerca de 20 milhões de pessoas em 35 de seus 39 municípios (SABESP, c2018), e é composto por oito sistemas produtores, cada qual com suas respectivas drenagens e/ou represas: Sistema Cantareira (Represas Paiva Castro, Águas Claras, Cachoeira, Atibainha, Jaguari e Jacareí), Sistema Guarapiranga (Represa Guarapiranga e Billings), Sistema Alto Tietê (Represas Ponte Nova, Jundiaí, Taiaçupeba, Biritiba-Mirim e Paraitinga), Sistema Rio Grande (Represa Braço do Rio Grande), Sistema Rio Claro (Ribeirão do Campo), Sistema Baixo Cotia (Isolina Superior e Inferior), Sistema Alto Cotia (Barragem da Graça e Pedro Beicht) e Sistema Ribeirão da Estiva (Rio Grande da Serra e Ribeirão Pires) (Apêndice 1).

O principal sistema de abastecimento é o Sistema Cantareira (Figura 1), responsável por 47% da demanda da RMSP e 65% da cidade de São Paulo (SABESP, 2015). É um sistema moderno e complexo de engenharia, onde interconecta por túneis cinco represas para, através de uma estação elevatória, bombear a água para cima da Serra da Cantareira, onde é acumulada em uma última represa, que alimenta através de um túnel a estação de tratamento no outro lado da Serra.

O relatório de Crise Hídrica, Estratégia e Soluções da SABESP – CHESS (SABESP, 2015) aponta que condicionantes climáticas atípicas ocasionaram um período de estiagem durante o intervalo dos meses de outubro de 2013 a fevereiro de 2014, onde houveram apenas 444 mm de chuvas na região do Cantareira. No entanto, baseado em uma série histórica de 1962 a 2014, a média seria de 995 mm, ou seja, uma redução de 55% de precipitação e, segundo a SABESP (2015), o sistema meteorológico causador da falta de chuvas não pode ser previsto com meses de antecedência.

Após fevereiro de 2014, mesmo com a atenuação desses eventos, o regime de chuvas não foi suficiente para corrigir a situação, mesmo porque a precipitação continuou abaixo das médias históricas, e conseqüentemente, com exceção ao Sistema Rio Claro, os reservatórios continuaram a reduzir seus volumes (Figura 2). Esse evento ocasionou a menor vazão média dos afluentes do Sistema Cantareira, sendo a pior da série histórica de 85 anos.

Figura 1 – Esquema do Sistema Cantareira.

Fonte: ANA (2017).

Em confronto com a crise hídrica a SABESP adotou diversas medidas emergenciais: rodízio, incentivos para o cliente que economizava, transferência de água de outros sistemas produtores e ações mais atuantes no combate à perda de água e vazamentos. Em seguida, houve medidas estratégicas, como incentivo à população à mudança de costumes para reduzir o consumo, propagandas em meios de comunicação, além do uso de reservas técnicas e do volume morto dos reservatórios. Por fim, houve o planejamento de grandes obras: adutoras para transpor drenagens de outras bacias para os afluentes do Cantareira, ampliação de capacidade de tratamento e aumento na capacidade de bombeamento de corpos hídricos já explorados.

Figura 2 – Dados hidrológicos do período de outubro de 2013 a outubro de 2014.

Fonte: SABESP (2015).

A SABESP também criou uma operação emergencial para caso as grandes obras planejadas não estivessem preparadas para novos eventos e, inserido nessa operação, o diagnóstico de abastecimento emergencial por poços (SABESP, 2015).

Segundo a SABESP (2015), em resposta à crise hídrica, diversas entidades e empresas demonstraram interesse em apresentar soluções para auxiliar a SABESP a aumentar a segurança hídrica da RMSP e, diante disso, a empresa abriu uma chamada pública para Consulta Técnica, onde foram apresentadas 100 propostas de diversos ramos, apontando soluções a partir de obras, tecnologias de tratamento, aproveitamento de águas poluídas, prospecção de mananciais subterrâneos, dentre outros. Importante ressaltar aqui a importância desse estudo, a fim de avaliar enormes possibilidades que os lagos de minas podem trazer para auxiliar no abastecimento público.

4.2 Lagos de Minas

Ao longo da atividade mineira, durante a abertura da lavra a céu aberto, se o lençol freático é atingido e torna-se aflorante na área da mina, ele é rebaixado através de bombeamentos para que a mineração ocorra. Após o encerramento das atividades, o lençol tende a retornar a sua posição original e, caso não haja contato com o lençol freático, tende a permanecer seco até a chegada do regime de chuvas.

Por fim, a cava torna-se preenchida por uma combinação de lençol freático, escoamento superficial e precipitação direta (CASTENDYK, D.; WEBSTER-BROW., 2010).

Os lagos de minas, para as mineradoras, são “elefantes na sala de fechamento de mina” (MCCULLOUGH; VAN ETEN, 2011, p.1), e quando há a fiscalização por parte dos órgãos governamentais, acarretam em passivos ambientais e multas de alto valor, muitas vezes condicionadas a Termos de Ajuste de Conduta (TAC) para a recuperação do local.

Áreas de mineração podem ganhar destinação nobre e a baixo custo (EUROPEAN COMMISSION, 2009), e não só a população é quem ganha com isso, mas também a empresa que realiza a atividade mineira que passa a substituir um passivo ambiental por uma área valorizada: aterros sanitários, construção de estacionamentos, shoppings e mercados, e quando o afloramento do lençol freático em superfície contribui com volumes expressivos de água, e os transformam em lagos de minas, podem ser utilizados para atividades de recreação, balneabilidade e ou piscicultura, ou ainda, para reservação de água para agricultura e abastecimento industrial ou público.

Dessa forma, planos de fechamento de mina podem fornecer benefícios econômicos, de saúde e bem-estar, de segurança ou estéticos à comunidade (MCCULLOUGH; LUND, 2006).

Nas últimas décadas, a preocupação em ser sustentável, favoreceu o desenvolvimento de projetos de forma intensa e diversa, empresas preocupam-se em iniciar, operar e encerrar suas atividades de forma a utilizar recursos terrestres e hídricos sem comprometer o futuro, preocupadas com diferentes questões ambientais (HANCOCK; WOLKERSDORFER, 2012).

O lago de mina, assim chamado quando a lavra a céu aberto atinge uma profundidade suficiente para aflorar o lençol freático, ou o *pit* é preenchido por águas de chuva ou drenagens, e a rocha é impermeável e não possui fugas de água, pode fornecer volumes expressivos e de boa qualidade de água, tornando-o uma fonte de água sustentável (JUNCOSA et al., 2016).

O planejamento é um importante fator para uma incorporação racional do lago de mina ao projeto de descomissionamento (DELGADO et al., 2013), não obstante na intenção de estar em conformidade, mas ir além e, desempenhar um papel fundamental como estratégia de sustentabilidade (KLEIMANN, 2012). Ecossistemas

saudáveis desenvolvidos em ambientes de lagos de minas oferecem à indústria de mineração oportunidades de cumprirem compromissos com a sustentabilidade (MCCULLOUGH; VAN ETEN, 2011). Deixam de ser passivo e tornam-se ativos: um compromisso sustentável.

Com o interesse em seu uso como fonte de água potável, há grande importância na gestão mais ativa na fase de fechamento de mina, no entanto, a fase de extração tem total importância, pois em contrapartida àquela, nessa pode haver a contaminação por vazamento de óleos, graxas e combustíveis. Nesse sentido, a fim de evitar a violação da qualidade da água, se faz necessário desde seu planejamento estar comprometido com a sustentabilidade desse recurso (BOWELL, 2003).

Segundo Delgado et al. (2013), a qualidade da água, assim como suas características físico-químicas são totalmente dependentes de diversos aspectos, tais como (a) o tipo de minério que é explorado (agregados, carvão, metais comuns, diamantes, etc.), (b) a capacidade de neutralização ou produção de ácido da rocha hospedeira, (c) as condições climáticas envolvidas durante e após o preenchimento da mina, (d) a disponibilidade hídrica do local, (e) a configuração geométrica do *pit*, a área da superfície e a profundidade do lago de mina, (f) a taxa de inundações e (g) as fontes de água associadas ao processo de inundação (CASTRO e MOORE, 2000; WERNER et al. 2001; BOLAND e PADOVAN, 2002; DENIMAL et al., 2005; CASTENDYK e WEBSTER-BROWN, 2007; CASTENDYK e EARY, 2009).

Por outro lado, em relação à segurança, o lago de mina poderá apresentar aspectos relacionados a presença de água em dois momentos: durante e após seu preenchimento. No primeiro a água pode promover risco de instabilidade da inclinação dos taludes, “em todos os casos em mineração a céu aberto, mais de 40% dos riscos de instabilidade do declive dependem das condições de água subterrânea...” (MANDZIC, 1992, p. 42). Já num segundo momento, após o preenchimento, a água torna-se uma massa expressiva exercendo pressão contrária à descompressão causada pela remoção do minério (SENA; MOLINERO, 2009) e se faz necessário o estudo de sismo induzido segundo Allaoua Saadi, professor do Departamento de Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG) (EDIMINAS, 2013).

Todavia, exemplos de utilização de lagos de minas como reservação de água potável são incipientes no mundo todo, assim como no Brasil. No noroeste da

Espanha um estudo nas minas de Barredo e Figaredo realizado por Jardon et al. (2013) avaliou a utilização de *shafts* e minas como reservatório de água para abastecimento de 60.000 pessoas.

No Brasil, a VALE S.A., após o fechamento da mina de Águas Claras, na Serra do Curral, limite entre as cidades de Belo Horizonte e Nova Lima, informou que a destinação do lago de mina ali formado seria para compor a paisagem de um empreendimento imobiliário de alto luxo que seria abastecido pela captação da água do próprio lago, no entanto, o foco da empresa mudou e atualmente o destino é a recomposição ambiental, e como curiosidade, a mina de Águas Claras levará quase 30 anos para seu preenchimento total, e será o lago mais profundo do país, com 234 metros de profundidade (VON SPERLING, 2004).

Apesar de o lago de mina ser um recurso de água importante, pouco é discutido a respeito na literatura acadêmica, principalmente de forma técnica (MCCULLOUGH, 2016), sendo mais amplamente debatida a questão de acidificação de drenagens e lagos de mineração.

Da mesma forma, mais incipiente ainda são os projetos de mineração planejados ou que resultaram em potenciais recursos hídricos a determinada população. Nesse sentido, faz-se necessário debater de forma técnica e discutir eventuais potencialidades de áreas de mineração com possibilidade de culminar em lagos de mina e em projetos de reservação de água para abastecimento público.

4.3 Potencialidade

Os principais fatores relacionados à potencialidade, ou seja, o quão capaz um lago de mina pode ser de fornecer uma vazão adequada para captação, são o volume de água que ele armazena e o tempo gasto para enchê-lo. A partir daí pode-se estimar uma vazão ideal, a fim de obter uma vazão considerável e sustentável com a relação de entrada de água no sistema. No entanto, com o intuito de uso emergencial e sazonal, apenas em períodos em que os sistemas tradicionais de reservação estejam comprometidos, entende-se que se seu uso possa extrapolar a fim de drenar sua capacidade total.

Para tanto, a avaliação do tempo que o reservatório deve encher contém muitos fatores e variáveis, tais como as entradas de água no sistema (fluxo de superfície e o fluxo do aquífero), as perdas de água (evapotranspiração, taxas de

infiltração, sub-solo não saturado) e o histórico de índices de precipitação para compor o balanço de massa. Dessa forma, essa avaliação do tempo de enchimento é uma análise criteriosa de armazenamento e transmissão de água (HERNÁNDEZ et al., 2012).

Nesse sentido, o presente trabalho busca apresentar ao leitor alguns cuidados ao analisar seu projeto e, de fato, grande parte dessas informações coletadas devem ser realizadas nas imediações ou na própria localidade do projeto, garantindo maior veracidade e fidelidade do modelo hidrogeológico, isso em função de que a estimativa de tempo calculado baseia-se nas entradas e saídas de água do sistema (SENA; MOLINERO, 2009).

É importante ressaltar que os valores obtidos nesse estudo não são fiéis a avaliações que possam ser realizadas em cada lago de mina, por carecer de dados de escala adequada, além de informações únicas dos projetos atuais de mineração, como as intenções das empresas, as oscilações de mercado, as configurações geométricas das lavras que são obtidas com levantamento topográfico de detalhe, os piezômetros necessários para averiguar o nível estático e dinâmico do entorno dos projetos, dentre outros aspectos, que podem confrontar acentuadamente com as estimativas desse projeto.

Um projeto de lago de mina para abastecimento público deve ser bem avaliado, isso porque de um lado temos obras de extensão de adutoras e equipamentos de bombeamento, ou ainda, estações de tratamento de água que são investimentos caros, de outro, temos a demanda, a necessidade por um recurso que pode ser ausente em algum período de tempo: a água. Portanto, faz-se necessária a presença de volumes consideráveis de água, ou ainda, a realização de obras para incrementar esses valores quando possível, como é o caso do planejamento para a mina da empresa Rio Tinto, La Rispina, onde o balanço hídrico apontou que a vazão seria expressiva a ponto de extrapolar os limites do *pit* e, portanto, havia a possibilidade de construção de barragens para aumentar a profundidade e área de captação de água de chuva (SENA; MOLINERO, 2009).

Em decorrência das particularidades de cada lago de mina e, principalmente suas restrições, sejam ambientais, geográficas, geológicas ou políticas, as lavras a céu aberto que não possuem um volume expressivo de capacidade de armazenamento de água não estão sujeitas necessariamente a exclusão de projetos de captação. Deve-se atentar a outras possibilidades, principalmente através da

gestão de empresas de saneamento público, as quais podem realizar a instalação de redes e sistemas de *píts* interconectados, ou ainda, lançar em drenagens e promover consideráveis aumento no volume de água a montante de uma Estação de Tratamento de Água (ETA).

Outra possibilidade existente é o enchimento artificial do lago, com a finalidade de reservação para posterior uso e, neste caso, a periodicidade de uso pode ser reduzida a ponto de ser economicamente favorável. Essa ação serve para lagos de minas que podem demorar a serem preenchidos ou não possuem significativos volumes de água final armazenados. Também pode ser aplicada para lagos de minas que estão contidos em rochas impermeáveis sem fontes de entrada de água natural advindas de aquíferos, que contam apenas com o volume de precipitação de água da chuva. O importante é que estes lagos estejam em localidades excepcionais e possuam capacidade de armazenamento expressiva.

O enchimento artificial de lagos de minas pode contar ainda com o bombeamento de drenagens de alta vazão em áreas adjacentes, cuja outorga do volume de água liberada pelo órgão gestor nos períodos chuvosos é irrisória em relação a capacidade do rio. Neste trabalho não será apresentado o tempo de enchimento dos lagos, uma vez que não é o objetivo do mesmo.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para obter a capacidade de reservação dos lagos de minas, foi necessário agrupar informações quantitativas (medições de nível estáticos por exemplo) e qualitativas (tipos de títulos minerários por exemplo) em um banco de dados. Inicialmente foi realizado a pesquisa de localização de possíveis áreas de mineração através da interpolação de dados de títulos minerários e sua comparação com imagens aéreas atuais. O processo de obtenção do nível do lençol freático se baseou pela avaliação estatística de poços tubulares profundos. O desenho das cavas foi a partir de dados topográficos em escalas adequadas a pesquisa científica.

A Figura 3 demonstra graficamente as etapas e relações dos processos deste estudo até obter o produto final, a modelagem do volume de reservação de água em lagos de minas

Figura 3 – Esquema de etapas e relações dos processos para obtenção da estimativa de capacidade de reservação de água de lagos de mina.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

5.1 Áreas de Estudo

A RMSP foi selecionada em função da crise hídrica por qual passou no findar de 2013 a início de 2014, e por possuir inúmeras áreas de lavra a céu aberto inseridas próximas ou no interior da malha urbana. Entende-se que o principal foco desse trabalho é abordar o contexto de lagos de minas para reservação de água para utilização em crises hídricas de forma geral. Para resultados reais (não estimados), cada mina deve ser avaliada na escala adequada, ou seja, os volumes obtidos por topografia e batimetria e, o nível estático obtido por piezômetros.

A busca por lagos de minas se deu inicialmente através de pesquisa em dados do Portal SIGMINE (ANM, 2017) que oferece todos os processos minerários do país. Através de filtragem em *shapefiles* de áreas de concessão de lavra e de licenciamento pode-se obter as áreas de lavras com títulos com alto potencial de haver um empreendimento mineiro. Posteriormente foi realizada a pesquisa em imagens aéreas *via software* Google Earth Pro (GOOGLE, c2018) e, comparadas com os dados obtidos em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) em *softwares* ArcGIS (ESRI, c2017) e Global Mapper (BLUE MARBLE GEOGRAPHICS, c2017).

O resultado dessa pesquisa foi a identificação para a RMSP de 40 áreas de lavra a céu aberto com potencial para formação ou presença de lagos de minas. Os lagos de minas foram agrupados em regiões em função de suas localizações (Apêndice 1).

5.2 Banco de Dados

Os *softwares* utilizados para gerenciar as informações em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas), além de interpolar os dados e gerarem as imagens aqui apresentadas, foram o ArcGIS 10.5 (ESRI, c2017), o Google Earth Pro 7.3.2 (GOOGLE, c2018) e o Global Mapper 18 (BLUE MARBLE GEOGRAPHICS, c2017), e o DATUM utilizado foi o SIRGAS2000 23K (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2005).

Os *shapefiles* foram adquiridos de diversos sítios e bancos de dados livres, cada qual com temas e detalhes restritos à escala da informação. Abaixo segue a relação das fontes e dados obtidos:

- BDGEx (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2012) – Meio físico do Brasil.
- DATAGEO (SÃO PAULO, c2017a) – Meio físico do Estado de São Paulo.
- GEOSAMPA (SÃO PAULO, c2017b) – Meio físico da Cidade de São Paulo.
- HIDROWEB (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA, c2017) – Recursos Hídricos das Bacias Brasileiras.
- FABHAT (FUNDAÇÃO AGÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ, 2009) – Recursos Hídricos da Bacia do Alto Tietê.
- ASTERWEB – ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER (CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, c2017) – Topografia da RMSP.
- LANDSAT (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, c2017) – Imagens aéreas
- WORLD IMAGERY (ESRI WORLD IMAGERY, c2017) – Imagens aéreas

5.3 Nível Estático

O nível estático (NE) de poços tubulares profundos foi obtido através de interpolação de dados dispostos no banco de dados do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE, 2017). Foram selecionados 10.657 de cerca de 30.000 pontos de outorga, seleção baseada em proximidade com a RMSP, presença de coordenadas e presença de informações dos poços. Foram descartados os poços com nível estático igual a “0”, mesmo sendo possível condizer com poços artesianos (jorrantes), isso porque há uma inconsistência no banco de dados do DAEE na transferência das informações outorgadas para o site ou por erro no preenchimento dos formulários de outorga.

Quanto a interpolação dos dados (Apêndice 2), o *software* utilizado foi o ArcGIS 9.3 e o método aplicado para o modelo estatístico do NE foi a krigagem ordinária com semivariograma gaussiano (GONÇALVES et al., 2015; MINEROPAR, 2001).

5.4 Capacidade de Reservação

Para cálculo de volume de água que um lago de mina pode reservar foi necessário realizar a modelagem matemática dos blocos, processo semelhante ao de obter o volume de um depósito mineral para uma lavra a céu aberto. O *software* escolhido para modelar os blocos e reportar essas informações foi o SURPAC versão 6.2 (GEMCOM SOFTWARE INTERNATIONAL INC, 2011). Para tanto, foram inseridos nesse ambiente informações cartográficas e topográficas do meio físico. Posteriormente foram desenhados os *pits* segundo as boas práticas da Engenharia de Minas e de acordo com as Normas Reguladoras da Mineração (BRASIL, 2001), adicionado o nível estático estimado para cada mina e, por fim, realizado a modelagem da capacidade quanto ao volume de reservação.

5.4.1 Topografia

A base cartográfica e topográfica do banco de dados é variada e baseada na escala existente. A cartografia e a topografia da cidade de São Paulo foram obtidas no portal GEOSAMPA (SÃO PAULO, c2017b), onde as curvas de nível são espaçadas de metro a metro, na escala 1:1.000. A cartografia foi obtida nos portais DATAGEO (SÃO PAULO, c2017a) e BDGEx (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2012) e a topografia foi obtida através do processamento de imagens *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), em software de geoprocessamento Global Mapper versão 18.

O processamento das imagens ASTER resultaram em curvas de nível de metro a metro também, no entanto, essas imagens são publicamente dispostas no portal da ASTERWEB (CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, c2017) com resolução de 30m, ou seja, com escala de 1:150.000.

5.4.2 Desenho dos Pits

Os *pits* foram desenhados no *software* SURPAC versão 6.2, baseado nas boas práticas utilizadas na Engenharia de Minas e segundo as Normas Reguladoras da Mineração (BRASIL, 2001), ou seja, os pits respeitam as delimitações de áreas referentes ao título minerário, as áreas de preservação permanente e de topo de

morro, além de considerar o espaço adequado para tráfego de veículos fora de estrada, a segurança no trabalho e a estabilidade dos taludes.

Em todos os casos, a configuração do pit também foi baseada em função da geologia regional e conhecimento do depósito, ou seja, da morfologia e continuidade lateral e vertical dos depósitos, onde foi atribuído modelos mais conservadores ou, até mesmo, mantidas configurações originais semelhantes.

Foram realizados dois desenhos de *pits* para cada mina, o primeiro seguiu a configuração da lavra atual da forma mais fiel possível, baseando-se em imagens aéreas atuais para as cavas em operação. Para as cavas já inundadas foi utilizado o recurso “Mostra imagens históricas” (Figura 4) do Google Earth Pro (GOOGLE, c2018), que possibilita visualizar as cavas em anos anteriores. O segundo desenho dos pits foi elaborado a fim de obter a maior profundidade possível, preservando uma área adequada para a manobra de equipamentos na última praça.

Figura 4 – Evolução da lavra e enchimento da mina nº 30 (Unidade de Arujá, Votorantim Cimentos S.A.).

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Como o objetivo deste último desenho foi obter a configuração final das lavras a céu aberto, o ângulo de talude utilizado foi de 75° , com bermas e taludes de 12 metros, ângulo global inferior a 40° , medidas conservadoras para atividade mineira (BRASIL, 2001). Para ambos os desenhos, pit atual e final (Figura 5), foram utilizados como suporte em alguns casos, além de imagens aéreas, fotos, observações in loco e, nas minas do Grupo Votorantim, a topografia oficial cedida pela empresa (VOTORANTIM, c2017).

Figura 5 – Comparação entre imagem aérea atual, desenho do pit atual e do pit final da mina nº 19 (Unidade Barueri, Lafarge do Brasil S.A.).

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

5.4.3 Estimativa dos Volumes

A estimativa de volumes de reservação de água foi classificada de três formas: o volume existente, a capacidade real e a capacidade possível (Figuras 6 e 7).

Para o volume de água existente foi considerado a configuração atual da cava e estimado o nível estático atual baseado na superfície de água visualizada em imagens de satélite atuais encontradas nos bancos de dados utilizados (USGS, 2017; ESRI, c2017), além de fotos e observações in loco.

Para a capacidade real, ou seja, para o volume de reservação de água possível de se obter ao encerrar as atividades de lavra atualmente foi considerado a configuração atual da cava até o limite de estabilidade do lençol freático, baseado no nível estático obtido pela análise geoestatística.

Para a capacidade possível, ou seja, o volume de reservação de água possível de se obter ao término da atividade mineira, baseado na configuração final da cava e no limite de estabilidade do lençol freático, baseado no nível estático obtido pela análise geoestatística.

Figura 6 – Imagem aérea, volume atual, capacidade real e final da mina nº 12 (Unidade Cajamar, Votorantim Cimentos). Nível estático atual estimado está à apenas três metros da estabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 7 – Lago 05: Pedreira Anhanguera, Imagem aérea atual, desenho do pit atual e situação do pit atual (inundado). Abaixo o pit final seco e inundado até o nível estático estável.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

6 RESULTADOS

A Tabela 1 - – Capacidade de Reservação de Água e Tamanho da Ocupação de Lagos de Mina na RMSP exhibe a identificação das áreas de mineração avaliadas, as empresas responsáveis pela lavra a céu aberto e a região da RMSP que estão localizadas. Essas informações foram dispostas para facilitar a discussão e a relação das lagoas com a possibilidade de atender a demanda emergencial de água em determinados sistemas de abastecimento da RMSP.

Estão relacionados na tabela os dados de volume de água existente atualmente, a capacidade real (volume de água que pode ser armazenado com a configuração atual da cava até a estabilização do nível estático) e a capacidade possível (volume de água com a configuração final da cava e estabilização do nível estático).

Também é apresentada uma relação de tamanho das áreas de ocupação da atividade mineira, atual e possível, essa está relacionada à configuração final da mina. Não foi levado em conta o tamanho das propriedades dessas empresas, assim como o bota-fora, pátio de britagem ou área administrativa. O valor representa a área de ocupação apenas da lagoa de mina, com o objetivo de comparar com as áreas de ocupação das represas que atendem à demanda de abastecimento público da RMSP.

Tabela 1– Capacidade de Reservação de Água e Tamanho da Ocupação de Lagos de Mina na RMSP.

Nº	EMPRESA	REGIÃO	VOLUME EXISTENTE (m³)	CAPACIDADE REAL (m³)	CAPACIDADE POSSÍVEL (m³)
1	Viterbo Machado Luz Mineração Ltda.	Sul	84.057	84.057	1.807.167
2	Votorantim Cimentos S.A.	Itapeirica - Embu	1.649	978.552	62.867.496
3	Pedra Alta de Mineração Ltda.	Itapeirica - Embu	840	249.695	9.106.029
4	Embu S.A. Engenharia e Comércio	Itapeirica - Embu	15.930	12.771.637	46.812.935
5	Pedreira Anhanguera S A Empresa de Mineração	Perus	363.227	751.080	7.968.829
6	Riuma Mineração Ltda.	Perus	0	3.158.141	14.757.546
7	Botuquara Administração, Emp. e Participações	Perus	13.120	3.058.892	17.653.665
8	Mineração Dominas Dell"Antônia Tosold S.A.	Perus	11.120	917.827	7.078.893
9	Embu S.a Engenharia e Comércio	Perus	0	0	11.444.225
10	Mineradora Pedrix Ltda.	Perus	0	0	24.771.712
11	Pedreira Anhanguera S A Empresa de Mineração	Cajamar	0	0	104.114.915
12	Votorantim Cimentos S A	Cajamar	2.138.984	2.435.719	4.572.145
13	Lafarge Brasil S A	Cajamar	1.177.187	8.694.976	84.199.363
14	Geocal Mineração Ltda	Cajamar	38.364	1.337.009	40.787.052
15	Tavares Pinheiro Industrial Ltda.	Cajamar	18.300	68.263	9.531.273
16	Adher Empreendimentos Ltda.	Cajamar	29.919	348.487	1.673.069
17	Votorantim Cimentos S A	Barueri	516.276	6.826.495	10.929.311
18	Sarp Extração de Areia Ltda.	Barueri	39.629	357.392	4.425.384
19	Lafarge Brasil S A	Barueri	0	0	300.578
20	Mineração Barueri Ltda.	Barueri	0	0	6.958.478

Nº	EMPRESA	REGIÃO	VOLUME EXISTENTE (m³)	CAPACIDADE REAL (m³)	CAPACIDADE POSSÍVEL (m³)
21	União Brasileira de Agregados Ltda.	Barueri	137.113	518.800	2.677.198
22	União Brasileira de Agregados Ltda.	Barueri	0	976.700	13.122.351
23	Concremix S.A.	Mairiporã	960	139.833	12.597.366
24	Holcim (brasil) S A	Mairiporã	10.500	320.201	2.891.512
25	Pedreira Cachoeira S.A.	Guarulhos	10.000	220.688	1.717.704
26	Pedreira Santana Ltda	Guarulhos	6.400	2.128.436	3.923.848
27	União Brasileira de Agregados Ltda.	Guarulhos	10.000	480.582	9.048.752
28	Paupedra Pedreiras, Pavimentações, Construções	Guarulhos	0	0	20.035.022
29	Pedreira Sargon Ltda.	Arujá – S. Isabel	0	0	15.170.526
30	Votorantim Cimentos S.A. - Arujá	Arujá – S. Isabel	158.254	255.313	2.704.651
31	Pedreira Dutra Ltda.	Arujá – S. Isabel	994.636	994.636	16.760.816
32	Votorantim Cimentos S.A. – Sta. Isabel	Arujá – S. Isabel	0	489.451	10.330.359
33	Guapiara Mineração Indústria e Comércio Ltda	Arujá – S. Isabel	12.000	15.699	5.173.149
34	Serveng Civilsan S.A.	Arujá – S. Isabel	0	0	3.926.827
35	Basalto Pedreira e Pavimentação Ltda	Arujá – S. Isabel	1.600	330.084	7.357.733
36	Pedreira Santa Isabel Ltda.	Arujá – S. Isabel	1.600	181.265	8.933.191
37	Embu S.A Engenharia e Comércio	Mogi	0	872.031	69.739.443
38	Pedreiras São Matheus Lageado S.A.	Itaquera	909.097	909.097	3.024.072
39	Pedreiras São Matheus Lageado S.A.	Itaquera	0	2.461.720	2.850.311
40	Pedreira Maria Teresa Ltda.	Biritiba	200	80.772	450.525
TOTAL			6.700.962	53.413.530	684.195.421

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

7 DISCUSSÕES

Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), atualmente, há pelo menos quarenta e oito lavras a céu aberto (ANM, c2017), onde quarenta e sete estão em plena atividade e, que em sua maioria, são pedreiras, ou seja, lavras de rocha a serem britadas e utilizadas na construção civil. O que é positivo, pois o rejeito desse tipo de mineração geralmente não apresenta contaminantes como o rejeito de minérios metálicos.

Destas lavras, foram selecionadas quarenta lavras a céu aberto (Apêndice 1) que apresentam fatores importantes para a configuração de um lago de mina, tal como (a) a possibilidade de avançar em profundidade configurando uma bacia, (b) a visualização de lâminas de água comprovando o afloramento do lençol freático em caso de lavras encerradas, (c) a capacidade de impermeabilidade e retenção da rocha, ou (d) a localização, próximas a centros urbanos ou a reservatórios e/ou estações de tratamento de água.

Para facilitar algumas análises e comparações, esta pesquisa trabalhou com o consumo médio de 10 m³ por economia domiciliar e 3 habitantes por economia domiciliar, valores médios utilizados em todo o país, além de relacionar todos a um mês de consumo. Também foi atribuído nas análises o montante de 21.575.281 habitantes para a RMSP (SÃO PAULO, c2018).

A Tabela 2 é uma ferramenta de classificação de lagos quanto ao seu tamanho (STRAŠKRABA & TUNDISI, 1999). Como ferramenta de apoio a discussão é apresentada a Tabela 3 (SABESP, c2018), que reúne o volume mínimo, máximo e médio de água contido nos reservatórios ao longo de 2018 na RMSP, assim como a Capacidade Real dos mesmos. A Tabela 4 agrupa as informações referentes aos lagos de minas de forma regionalizada.

Tabela 2 – Classificação de reservatórios quanto volume.

CATEGORIA	VOLUME (m ³)
Grande	10.000.000.000 - 100.000.000.000
Médio	100.000.000 - 10.000.000.000
Pequeno	1.000.000 - 100.000.000
Muito Pequeno	< 1.000.000

Fonte: Straškraba & Tundisi (1999).

Tabela 3 – Características de volume dos Mananciais da RMSP em ordem decrescente de Capacidade Real.

MANANCIAL	Volume Mínimo (09/18) (m³)	Volume Máximo (04/18) (m³)	Volume Médio (2018) (m³)	Capacidade Real (m³)
Cantareira	329.760.000	532.280.000	447.972.667	982.000.000
Alto Tietê	257.350.000	355.800.000	303.272.667	520.000.000
Guarapiranga	82.950.000	152.380.000	113.381.333	171.000.000
Rio Grande	83.150.000	98.780.000	91.208.000	112.000.000
São Lourenço	23.220.000	68.740.000	32.321.667	89.000.000
Cotia	6.930.000	15.220.000	12.349.333	16.500.000
Rio Claro	4.760.000	13.940.000	10.618.000	16.000.000
Volume total	788.120.000	1.237.140.000	1.011.123.667	1.906.500.000

Fonte: SABESP (2018).

Tabela 4 – Volumes dos lagos estimados por região em ordem decrescente da Capacidade Possível.

LAGOS POR REGIÃO	VOLUME EXISTENTE (m³)	CAPACIDADE REAL (m³)	CAPACIDADE POSSÍVEL (m³)
Cajamar	3.402.754	12.884.454	244.877.817
Itapeirica - Embu	18.419	13.999.884	118.786.460
Perus	387.467	7.885.940	83.674.870
Arujá - Santa Isabel	1.168.090	2.266.448	70.357.252
Mogi	0	872.031	69.739.443
Barueri	693.018	8.679.387	38.413.300
Guarulhos	26.400	2.829.706	34.725.326
Mairiporã	11.460	460.034	15.488.878
Itaquera	909.097	3.370.817	5.874.383
Sul	84.057	84.057	1.807.167
Biritiba	200	80.772	450.525
Volume Total	6.700.962	53.413.530	684.195.421

FONTE: Elaborado pelo autor (2019).

7.1 Volume Existente

Segundo a Tabela 1, a soma de todo o Volume Existente de água nos lagos de mina da região metropolitana de São Paulo é de 6.700.962 m³, suficiente para abastecer ao longo de um mês de crise hídrica 670.096 residências, o mesmo que 2.010.289 habitantes ou 9% da população da RMSP. Quando comparado com a reservação total de água nos reservatórios da Grande São Paulo, que é em média 1.011.123.667 m³ (Tabela 3), o volume existente representa apenas 0,66%, mas se comparado ao menor reservatório, o Rio Claro, ele representa 63,11% do total.

A análise regional dos lagos de mina quanto ao Volume Existente apresentam valores irrisórios como em Mogi e Biritiba, por outro lado, há algumas oportunidades remotas como em Mairiporã, Itapeirica-Embu e Guarulhos, onde o volume atenderia de 3 a 8 mil pessoas em média e até 25 mil pessoas na região Sul. Já em Perus e Barueri os volumes são mais significativos e poderiam abastecer de 116 e 208 mil habitantes, respectivamente. Em Itaquera e Arujá-Santa Isabel, valores são substanciais, onde teriam condições de suprir essa demanda para cerca de 270 e 350 mil habitantes. Já para os lagos de mina contidos na região Cajamar, estima-se que o volume existente poderia abastecer mais de um milhão de habitantes ao longo de um mês de estiagem, o que representa quase 5% da população da RMSP.

Pode ser observado que os cinco maiores volumes existentes (12, 13, 31, 38, 17 da Tabela 1) totalizam 5.736.180 m³, ou seja, seriam capazes de atender 1.720.854 habitantes, o que representa aproximadamente 8 % da população da região metropolitana de São Paulo. Sozinhos, os lagos de mina 12 e 13 atenderiam 641.695 e 353.156 habitantes, respectivamente, 3,20% e 1,76% dos habitantes da mesma região (Cajamar).

Quando avaliados isoladamente, cerca de metade das áreas possuem volume de água insignificante, aproximadamente 37% atenderiam a demanda de localidades entre 1.000 e 50.000 habitantes, 15% atenderiam demandas entre 100.000 e 350.000 habitantes e apenas uma, o lago 12 (Tabela 1), teria condições de abastecer mais de 500 mil habitantes, correspondendo a aproximadamente 3% da população da RMSP (642 mil). Ainda assim, os lagos 12 e 13 são classificados como pequenos, enquanto o restante é muito pequeno (Tabela 2).

7.2 Capacidade Real

Ao observar os dados de Capacidade Real, ou seja, do que obteríamos ao encerrarmos hoje esses empreendimentos e fosse aguardada a estabilização do nível estático, teríamos um cenário completamente positivo. Primeiramente, o volume do conjunto de lagos seria de 53.413.530 m³, o que corresponde a 5,28% do volume dos mananciais da RMSP, 12% do Cantareira, 47% do Guarapiranga e pelo menos cinco vezes maior que o Rio Claro. Esse volume de água teria condições de manter 74% da população abastecida.

Com exceção a região Sul e Biritiba, que teriam condições limitadas de atendimento a demanda para em média 25 mil habitantes, as outras localidades são mais expressivas. Respectivamente, Mairiporã e Mogi representam 2 % e 4% da RMSP e, Arujá-Santa Isabel, Guarulhos e Itaquera abasteceriam de 700.000 a 1.000.000 habitantes. Já Perus, Barueri, Cajamar e Itapevicirica-Embu representam 11, 12, 18 e 19% dos habitantes da RMPS.

Os nove lagos de mina com volume superior a 1.000.000 m³ cada em capacidade real (em ordem de maior volume: lagos 4, 13, 17, 6, 7, 39, 12, 26 e 14) seriam capazes de abastecer em um mês cerca de 4.287.303 casas, o mesmo que 12.861.908 habitantes, praticamente 60% dos habitantes da Grande SP.

O maior lago de mina em Capacidade Real, lago 4, teria condições de sozinho abastecer 3.831.491 habitantes, cerca de 18% da população dessa região. Já a somatória da capacidade real dos lagos de mina representa cerca de 5% do volume dos reservatórios atuais da região e possui volume cinco vezes maior que o Reservatório Rio Claro (Tabela 3). Esse valor representa quase que metade do volume do reservatório Guarapiranga. O lago 4, com seus quase 13 milhões de metros cúbicos se assemelha a reservatórios pequenos como o Rio Claro e Cotia, que o superam em 3 e 3,5 milhões de metros cúbicos.

Cerca de 22,5% dos lagos com Capacidade Real possuem volume superior a 1.000.000 m³ e podem ser classificados como reservatórios pequenos (Tabela 2), os outros são considerados muito pequenos.

Quanto ao potencial de abastecimento, 7,5% atendem sozinhos de 2 a 3 milhões de pessoas, e os lagos 4, 13 e 17 representam o abastecimento de 39% da RMSP. Já os lagos que atendem acima de 500.000 habitantes representam 12,5%, acima de 100.000 habitantes representam 32,5%. 27,5% dos lagos abasteceriam

uma média de 50 mil habitantes cada e 20% das áreas de lavra a céu aberto que condizem a Capacidade Real da RMSP não teriam condições sequer de acumular água.

7.3 Capacidade Possível

Ao avaliar o volume total de água para a Capacidade Possível temos que a soma atinge 684.195.421 m³ de reservação de água, este valor representa 35,88% do volume total dos mananciais de RMSP e só é inferior ao volume contido no Sistema Cantareira.

Para a Capacidade Possível também temos as regiões de Biritiba e Sul como de volumes inferiores, no entanto, ainda significativos e, capazes de abastecer isoladamente 0,64 e 2,58% da população de RMSP, respectivamente. Já Itaquera representa o abastecimento de pouco mais de 8% e Mairiporã 22% da RMSP. Guarulhos e Barueri poderiam atender mais de 10.000.000 habitantes cada uma, enquanto que Mogi e Arujá-Santa Isabel atingem cerca de 100% de atendimento da RMSP. As áreas de lavra de Itapeirica-Embu e Cajamar teriam condições de reservar cerca de 118 e 244 milhões de m³ de água, respectivamente.

A soma dos oito maiores lagos, com volumes acima de 20.000.000 m³ cada (lagos 11, 13, 37, 2, 4, 14, 10, 28), representam o abastecimento de cerca de 6 vezes mais habitantes que a população atual da RMSP. Já o maior lago que poderia ser formado nessa região, poderia atingir sozinho cerca de 10% da capacidade total do Sistema Cantareira, maior reservatório da RMSP (SABESP, 2018).

Individualmente a Capacidade Possível dos lagos possui grande representatividade também, eles são capazes de abastecer a partir de cerca de 90 mil habitantes como no lago de menor volume, o lago 19, até cerca de 31 milhões de habitantes no lago 11. Essa ordem de grandeza torna os lagos de mina passíveis de serem reservatórios perenes com vazão de regularização adequada.

Cabe aqui uma ressalva quanto a valores de reservação tão significativos como o lago 11, entende-se que a lavra dificilmente atingiria o volume de Capacidade Possível, mesmo se não houvesse ocupação no entorno. O custo com a Distância Média de Transporte (DMT) da frente de lavra ao britador primário, ou ainda, o custo energético para bombeamento de água durante a lavra poderia ser muito elevado a ponto de não haver viabilidade financeira.

Quanto ao uso isolado, 25% dos lagos atenderiam de 90 mil a 1 milhão de habitantes, 12,5% de 1 a 2 milhões, 20% de 2 a 3 milhões, 17,5 de 3 a 5 milhões, 10 % de 5 a 10 milhões e 15% das lagoas atenderiam acima de 10 milhões de habitantes. Além de que, 7,5% atenderiam individualmente a demanda da RMSP.

Com exceção ao lago 14 que é classificado como reservatório Médio e, aos lagos 36 e 38 que são Muito Pequenos, o restante dos trinta e sete lagos são classificados como reservatórios Pequenos (Tabela 2.).

Como exemplo aplicado, para a região denominada de “Lagos Sul” (Figura) que é composta pelos *pits* da empresa Viterbo Machado Luz Mineração Ltda. (ANM, c2017), nos quais dois lagos de mina já se encontram preenchidos e outro está em operação de lavra (Figura). As Capacidades Possíveis dos reservatórios são estimadas em 1.807.167 m³, sendo categorizado como Pequeno (STRAŠKRABA; TUNDISI, 1999).

Em um evento emergencial que a RMSP tivesse a disponibilidade o Sistema Lagos Sul, esses lagos poderiam abastecer por um mês cerca de 180 mil residências ou cerca de 540 mil habitantes. De fato, esses valores são superestimados em função das características atuais, pois a lavra 1 ainda está em operação e os *pits* 2 e 3 não possuem confiabilidade em termos de profundidade (Figura 9). Por outro lado, essa estimativa inicial visa chamar a atenção desses lagos de minas, que podem ser importantes fontes de recursos hídricos para a sociedade.

Figura 8— Modelo de blocos do sistema Lagos Sul, estimativa de recursos futuros.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 9 – Imagem aérea de Lagos Sul.

Fonte: Google Earth Pro (c2018).

Outro fato importante desse sistema é a proximidade com o Sistema Guarapiranga, distando 4 km da Represa Guarapiranga e apenas 2 km da Represa Billings, podendo a água ser tratada *in situ* e distribuída ou diluída nos reservatórios adjacentes. Esses são pontos que podem ser observados no planejamento de um lago de mina.

A proximidade com drenagens pode favorecer o escoamento da água captada no lago de mina e que pode ser direcionada para uma estação de tratamento a jusante, uma vez que as captações são nas drenagens. Essa ação corrobora projetos de baixo custo e sem grande necessidade de obras.

Faz-se necessário averiguar os custos desses projetos: “Para encontrar os valores limites é necessária uma combinação de medidas técnicas e administrativas, tendo em conta soluções economicamente viáveis” (METSCHIES e PAUL, 2012, p. 415).

8 CONCLUSÕES

A pesquisa obteve resultados de volume significativo de reservação de água em lagos de mina atuais e, ainda, verificou que são de uma ordem de grandeza considerável quando comparados a grandes corpos hídricos utilizados para captação de água para consumo humano.

Os métodos utilizados foram satisfatórios para estimar volumes de reservação de água em simulações de projetos de mineração, mas a pesquisa entende que os métodos aplicados devam respeitar escalas de trabalho mais confiáveis para cada empreendimento. Projetos futuros de minerações que contemplem estudos semelhantes podem beneficiar a sociedade com avaliações que hoje são ínfimas.

Como pode ser verificado, apesar dos diversos níveis de incerteza, os lagos de mina merecem uma atenção especial para o saneamento básico e, podem trazer bons resultados, tanto para o gestor ambiental, assim como para a empresa de mineração e, principalmente, para a sociedade. É viável a avaliação da utilização dos lagos de mina como reservatórios em projetos de descomissionamento de mina e, ainda, que sejam alinhados com empresas gestoras de saneamento e com os governos municipais e estaduais.

Na avaliação dos lagos de mina em escala adequada devem ser contemplados estudos mais completos, com o uso de dados hidrológicos, ou se possível, instalação de piezômetros antes e durante a atividade mineira.

A sociedade tem forte opinião a respeito das áreas de mineração, porém ela precisa estar embasada pelo “conhecimento científico de seus potenciais efeitos ambientais e abordagens tecnológicas que podem ser usadas para resolver questões ambientais” (POPE E CRAW, 2015), e isso pode acarretar em vantagens ao minerador, afinal, práticas sustentáveis podem garantir ou facilitar a liberação de licenças ambientais de projetos mineiros. Nesse sentido, Pope e Craw (2015, p. 1) afirmam que “a mineração moderna exige cada vez mais uma licença social para realizar todas as atividades, desde a exploração até o fechamento final”.

Portanto, quanto à questão levantada inicialmente: lagos de mina, alternativa para abastecimento público? Sim, este trabalho sustenta a ideia de que minerações bem planejadas e engajadas com práticas sustentáveis e preocupadas com o meio ambiente e com a sociedade, podem ter nos lagos de mina soluções como o abastecimento público em períodos de crise hídrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **HIDROWEB**: Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 11 fev. 2017a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Sala de Situação**. Sistema Cantareira. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/sala-de-situacao/sistema-cantareira/sistema-cantareira-saiba-mais>. Acesso em: 19 abr. 2017b.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **SIGMINE**: Sistema de Informações Geográficas da Mineração. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/assuntos/ao-minerador/sigmine>. Acesso em: 19 abr. 2017.

BOLAND, K. T.; PADOVAN, A. V.. Seasonal stratification and mixing in a recently flooded mining void in tropical Australia. **Lakes Reserves Management**, 7:125–131, 2002. DOI:10.1045/j.1440-169X.2002.00176

BOWELL, R. *Pit Lake Systematics: A Special Issue*. **Mine Water and the Environment**, 22: 167–169, 2003.

BLUE MARBLE GEOGRAPHICS. **Software Global Mapper 18**. Disponível em: <https://www.bluemarblegeo.com>. Acesso em: 01 abr. 2017.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **Portaria nº 237, de 8 de outubro de 2001**. Aprova as Normas Reguladoras da Mineração – NMR, de que trata o Art. 97 do Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967.

CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **ASTERWEB**: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). Disponível em: <<http://www.asterweb.jpl.nasa.gov>>. Acesso em: 11 fev. 2017.

CASTENDYK, D. N.; WEBSTER-BROWN, J. G.. Sensitivity analyses in *pit* lake prediction, Martha Mine, New Zealand 1: relationship between turnover and input water density. **Chemical Geology**, 244:42–55, 2007. DOI:10.1016/j.chemgeo.2007.06.004

CASTENDYK, D. N.; EARY, L. E.. The nature and the global distribution of *pit* lakes. In: Castendyk DN, Eary LE (eds) *Mine pit lakes: characteristics, predictive modeling, and sustainability*. **Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton**, 3:1–11, 2009.

CASTENDYK, D.; WEBSTER-BROW.. Effects of mine expansion on geochemical predictions of pit lake water quality: an example from Martha Mine, Waihi, New Zealand. **Journal of Geology and Geophysics**, 53:2-3, 143-151, 2010. DOI: 10.1080/00288306.20.

CASTRO, J. & MOORE, J. Pit lakes: their characteristics and the potential for their remediation. **Environmental Geology**, 39: 1254, 2000. doi:10.1007/s002549900100

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **CHES: Crise Hídrica, Estratégia e Soluções da SABESP, para a Região Metropolitana de São Paulo.** Relatório Público, 2015.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. (SABESP) **Mananciais.** Disponível em <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=31>. Acesso em 20 de abril de 2018.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). **Dados dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo.** Disponível em: <<http://www.daee.sp.gov.br/>>. Acesso em: 19 abr. 2017.

DELGADO, J.; JUNCOSA, R.; FALCÓN, I.; CANAL, J.. Four years of continuous monitoring of the Meirama end-pit lake and its impact in the definition of future uses. **Environ Sci Pollut Res**, 20:7520-7533, 2013. DOI 10.1007/s11356-013-1618-9

DENIMAL, S.; BERTRAND, C.; MUDRY, J.; PAQUETTE, Y.; HOCHART, M.; STEINMANN, M.. Evolution of the aqueous geochemistry of mine *pit* lakes—Blanzey–Montceau-les-Mines coal basin (Massif Central, France): origin of sulfate contents; effects of stratification on water quality. **Applied Geochemistry**, 20:825–839, 2005. DOI:10.1016/j.apgeochem.2004.11.015

ESRI INC.. **Software ArcGIS Desktop Versão 10.5.** Disponível em: <https://pro.arcgis.com>. Acesso em: 01 abr. 2017.

ESRI INC. **WORLD IMAGERY.** Banco de dados do ARCGis. Disponível em: https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer. Acesso em: 20 abr. 2017.

EUROPEAN COMMISSION (EC). **Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities: January, 2009.** Disponível em: <<http://eippcb.jrc.ec.europa.eu>>. Acesso em: 01 jan. 2017.

FUNDAÇÃO AGÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ. (FABHAT). **Plano da Bacia e Base Cartográfica:** 2009. Disponível em: <www.fabhat.org.br>. Acesso em: 11 fev. 2017.

GEMCOM SOFTWARE INTERNATIONAL INC.. Software **Gemcom Surpac(TM) 6.2,** 2011. Disponível em: <https://www.3ds.com/products-services/geovia/products/surpac/>. Acesso em: 01 abr. 2017

GOOGLE. **Software Google Earth Versão 7.3.2.** Disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>. Acesso em: 01 abr. 2018.

GONÇALVES, T. S.; SILVA, H.M.; ALVES, J. E; SALES L. Q; MELO, D. H. C. T. B.. **O Uso da Krigagem Ordinária na Interpolação do Nível Estático em Poços da Formação São Sebastião, Bacia do Recôncavo Norte, BA.** XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília – DF, 2015.

HANCOCK, S.; WOLKERSDORFER C.. Renewed Demands for Mine Water Management. **Mine Water Environment**, p147–p158, 2012.

HERNÁNDEZ, H.; PADILLA, F.; JUNCOSA, R.; VELLANDO, P. R.; HERNÁNDEZ, H.. A numerical solution to integrated water flows: Application to the flooding of an open *pit* mine at the Barcés river catchment – La Coruña, Spain. **Journal of Hydrology**, 472–473: 328–339, 2012.

EDIMINAS. Jornal HOJE EM DIA de 24 jan. 2013. Produzido por Alberto Sena. Disponível em: <https://www.hojeemdia.com.br/primeiro-plano/economia/ap%C3%B3s-12-anos-mina-de-%C3%A1guas-claras-ainda-tem-futuro-incerto-1.95046>. Acessado em: 01 abr. 2017

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Fundação do IBGE. Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro. **Resolução nº 1**, 25 de fevereiro de 2005.

JARDON, S.; ORDÓÑES, A.; ÁLVARES, R.; CIENFUEGOS, P.; LOREDO, J.. Mine Water for Energy and Water Supply in the Central Coal Basin of Asturias (Spain). **Mine Water Environment**, 32:139–151, 2013. DOI 10.1007/s10230-013-0224-x

JUNCOSA, R.; DELGADO, J.; PADILLA, F.; VELLANDO, P. R.; HERNÁNDEZ, H.. Improvements in Mero River Basin Water Supply Regulation Through Integration of a Mining *Pit* Lake as a Water Supply Source. **Mine Water Environment**, 35:389, 2016. DOI 10.1007/s10230-015-0378-9

KLEIMANN, B.. Book Review — Mine *Pit* Lakes: Closure and Management. **Mine Water Environment**, 31:79–80, 2012. DOI 10.1007/s10230-012-0174-8

MANDZIC, E. H.. Mine water risk in open *pit* slope stability. **Mine Water and The Environment**, 11:35-42, 1992. DOI:10.1007/BF02918446

MCCULLOUGH, C. D.; LUND, M. A.. Opportunities for Sustainable Mining *Pit* Lakes in Australia. **Mine Water and the Environment**, 25: 220–226, 2006.

MCCULLOUGH, C. D.; VAN ET TEN, E. J. B.. Ecological Restoration of Novel Lake Districts: New Approaches for New Landscapes. **Mine Water Environment**, 30:312–319, 2011. DOI 10.1007/s10230-011-0161-5.

MCCULLOUGH, C. D.. Mine Water Research: Enhancing Mining Industry and Academic Collaboration. **Mine Water Environment**, 35:113–118, 2016. DOI 10.1007/s10230-015-0375-z.

METSCHIES, T.; PAUL, M.; Management of mine and tailings seepage water discharge in an intensively used watershed. **International Mine Water Association. Anual Conference**, p409 – 416, 2012

MINERAIS DO PARANÁ S.A. (MINEROPAR). **Atlas Geoquímico do Estado do Paraná**. Curitiba, 2001. 80p.

MINISTÉRIO DA DEFESA. Exército Brasileiro. Diretoria de Serviço Geográfico. **BDGEX**: Banco de Dados Geográficos do Exército, 2012. Disponível em: <<https://bdgex.eb.mil.br/>>. Acesso em: 11 fev. 2017.

POPE, J.; CRAW, D.. Current Research on Mine Water and the Environment in New Zealand. **Mine Water Environment**, 34:363, 2015. DOI 10.1007/s10230-015-0374-0

SÃO PAULO. Governo do Estado. **DATAGEO**: Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo - IDEA-SP : Base Territorial Ambiental Unificada. Disponível em: <datageo.ambiente.sp.gov.br>. Acesso em: 11 fev. 2017a.

SÃO PAULO. Governo do Estado. **EMPLASA**: Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A. Disponível em <https://www.emplasa.sp.gov.br>. Acesso em 20 abr. 2018.

SÃO PAULO. Prefeitura Municipal. **GEOSAMPA**: Mapa Digital da Cidade de São Paulo. Disponível em: <<http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br>>. Acesso em: 11 fev. 2017b.

SENA, C.; MOLINERO, J.. Water Resources Assessment and Hydrogeological Modelling as a Tool for the Feasibility Study of a Closure Plan for an Open *Pit* Mine (La Respina Mine, Spain). **Mine Water Environment**, 28:94–101, 2009. DOI 10.1007/s10230-009-0067-7

STRAŠKRABA, M.; TUNDISI, J. G.. Reservoir Water Quality Management: Guidelines of Lake Management. Estudos Avançados **Kusatsu, Japan: International Lake Environmental Committee**, 1999. v.9, 227p.

VON SPERLING, E.; JARIDIM, F.A.; GRANDCHAMP, C.A.P.. **Qualidade da água durante a formação de lagos profundos em cavas de mineração: estudo de caso do lago de Águas Claras – MG**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 9, n. 3, p. 250-259, set. 2004.

VOTORANTIM. Banco de dados: Topografia. Não disponível. Acesso em: 19 abr. 2017.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **LANDSAT**: Landsat Data Continuity Mission. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov>. Acesso em: 19 abr. 2017

WERNER, F.; BILEK, F.; LUCKNER, L.. Implications of predicted hydrologic changes on Lake Senftenberg as calculated using water and reactive mass budgets. **Min Water Environment**, 20:129–139, 2001. DOI:10.1007/s10230-001-8094-z

APÊNDICE 1 – Mapa de localização dos lagos de minas da RMSP

APÊNDICE 2 – Mapa de nível estático da RMSP

LOCALIZAÇÃO

LEGENDA

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

- Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)
- Regiões dos Lagos

Regiões de Lagos de Minas

- Arujá - Santa Isabel
- Barueri
- Biritiba
- Cajamar
- Guarulhos
- Itapecerica - Embu
- Itaquera
- Mairiporã
- Mogi
- Perus
- Sul

Nível Estático (m)

- 0 - 16
- 16 - 33
- 33 - 50
- 50 - 67
- 67 - 84
- 84 - 100
- 100 - 117
- 117 - 134
- 134 - 150

REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO
Nível Estático Médio do Lençol Freático com a Localização dos Lagos de Minas

Projeto	Lagos de Minas	Município	Região Metropolitana de São Paulo	Estado	SP	Data	20/04/2018
Instituição	Universidade de São Paulo	DATUM Horizontal	SIRGAS2000	DATUM Vertical	Marégrafo de Imbituba - SC		

Base Cartográfica
SÃO PAULO: GEOSAMPA - E: 1:1.000 e 1:5.000
REGIÃO METROPOLITANA - BDGEX - CARTAS TOPOGRÁFICAS - 1:50.000
REGIÃO METROPOLITANA - DATAGEO - CARTOGRAFIA DIGITAL - 1:50.000
DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - POÇOS TUBULARES PROFUNDOS