

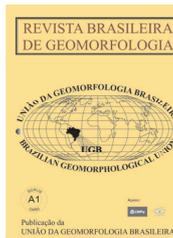


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 20, nº 4 (2019)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1552>



METODOLOGIA PARA VERIFICAÇÃO DE VOLUMES DE BACIAS DE REJEITO DE MINERAÇÃO POR GEOPROCESSAMENTO – BARRAGEM DE MARAVILHAS II (QUADRILÁTERO FERRÍFERO-MG)

METHODOLOGY FOR VERIFYING MINING TAILING DAMS' VOLUME USING GEOPROCESSING - BARRAGEM MARAVILHAS II (QUADRILÁTERO FERRÍFERO - MG)

Lourdes Manresa Camargos

Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP 31270-901. Brasil
ORCID: 0000-0001-9407-8105
E-mail: loumcamargos@hotmail.com

Paulo César Horta Rodrigues

Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP 31270-901. Brasil
ORCID: 0000-0003-1060-2374
E-mail: pchr@cdtn.br

Marcelo Antônio Nero

Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP 31270-901. Brasil
ORCID: 0000-0003-2124-5018
E-mail: marcelo-nero@ufmg.com

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
07/01/2019
Aceito (Accepted):
25/05/2019

Palavras-chave:

Barragens de Rejeito;
Geoprocessamento; Modelos
Digitais de Terreno.

Keywords:

Tailings Dam; Geoprocessing;
Digital Elevation Model.

Resumo:

Após o rompimento da barragem de Fundão em Mariana-MG, da mineradora Samarco em novembro de 2015, as atenções se voltaram para a necessidade de um melhor conhecimento e controle das demais barragens de rejeito de mineração. Uma das formas de se investigar eventuais irregularidades dessas estruturas, que se localizam em vales de bacias hidrográficas, é verificar se os volumes declarados pelas mineradoras para as suas bacias de rejeito realmente correspondem às informações prestadas nos respectivos processos de licenciamento ambiental. Em função dos acidentes já ocorridos no Estado de Minas Gerais referentes ao rompimento de barragens de mineração e do potencial de dano ambiental e social resultantes, essa pesquisa teve como objetivo propor uma metodologia para o cálculo independente do volume de rejeitos na barragem Maravilhas II, localizada no município de Itabirito-MG, por meio de análise espaço-temporal, utilizando ferramentas de geoprocessamento e análise geomorfológica. Para isso, foi calculado o volume de rejeito da barragem Maravilhas II através de subtração do MDT de 1977 (antes da construção da barragem) e do MDT atual (2017). O

método de cálculo baseado na Grade Regular Retangular, foi considerado mais preciso e, como resultado, obteve-se uma estimativa de 74.366.813 m³ de volume de rejeito inserido na Barragem Maravilhas II. Este resultado mostra que a barragem se encontra em conformidade com a legislação ambiental, que prevê um volume máximo de 76.000.000m³. Concluiu-se que a metodologia pode ser utilizada para estudos semelhantes para o caso de outras barragens, visando maior controle dos volumes de rejeitos das barragens e contribuir para o monitoramento destas, minimizando ou evitando possíveis impactos ambientais, sociais e econômicos causados pela atividade mineradora.

Abstract:

After the breach of Samarco's tailings dams in November of 2015, it was made clear that a better understanding and inspection of the mining dams was needed. One of the ways of inspecting eventual irregularities on this structures, that are located in hydrographic watersheds' valleys, is verifying if the mining company's declared volume of the tailing dams are according with the information given in the environmental licenses' processes. With the social and environmental hazards caused by the breaching of the mining dams in the state of Minas Gerais in sight, this academic research offers a methodology for the independent measuring of the tailings volume on the Barragem Maravilhas II, located in the Itabirito county in Minas Gerais State, through a space-time analysis, using geoprocessing tools and geomorphological analysis. For that, the volume of the tailing in the Barragem Maravilhas II was measured through subtraction of the 1977's DTM (before building the dam) and the current (2017) DTM. The more precise method of measurement was the Regular Grids and as a result an evaluation of 74.366.813 m³ of tailings' volume in the Barragem Maravilhas II was obtained. This result shows that the dam is in conformity with the environmental legislation, which foresees a maximum volume of 76.000.000 m³. This methodology can be replicated in other dams to have a more precise monitoring of this kind of structure, minimizing or even avoiding possible environmental, social and economic hazards due of the mining activity.

Introdução

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2014), Minas Gerais é o maior produtor de minério do Brasil, totalizando 47% da produção nacional. Essa posição de maior produtor se deve especialmente à região do Quadrilátero Ferrífero, território geológico em Minas Gerais, composto por um polígono aproximadamente quadrangular, definido pelas cidades de Belo Horizonte (a noroeste), Congonhas (a sudoeste), Ouro Preto (a sudeste) e Caeté (a nordeste), abrigando grandes minerações de ferro e ouro.

Segundo a Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM, 2017), foram contabilizadas no ano de 2013 o total de 737 estruturas de barragens no Estado, sendo 425 somente de barragens de mineração, distribuídas em diferentes classes de potencial de dano ambiental. Somente a região do Quadrilátero contava nesse ano com 307 barragens de rejeito de mineração. Sabe-se que a mineração é responsável por promover diversos impactos ambientais e sociais, tais como geração de áreas degradadas, poluição atmosférica, contaminação das águas, desmatamentos, erosão do solo, assoreamento dos corpos d'água, conflitos de

uso do solo, depreciação de imóveis circunvizinhos, transtornos no tráfego urbano, ruídos e vibrações na vizinhança, dentre outros (REZENDE, 2016). A esses impactos soma-se ainda a esterilização econômica sofrida pelos municípios minerários, decorrente da dependência crescente do modelo de mineração.

O Quadrilátero Ferrífero, por sua vez, é área prioritária para conservação da biodiversidade de Minas Gerais, sendo classificada como "Área de Importância Biológica Especial" (FUNDAÇÃO BIODIVERSITAS, 2005). Segundo Alberti *et al.* (2015), as florestas e os campos dessa região são de extrema relevância para a manutenção da flora e fauna silvestres, sobretudo das espécies endêmicas, raras e ameaçadas de extinção.

Soma-se a essas singularidades a fundamental importância das áreas de recarga hídrica dos topos de morro do Quadrilátero com vistas ao abastecimento público de água de Belo Horizonte e de muitos dos municípios de sua região metropolitana. Por essa razão, alguns de seus territórios foram transformados em Unidades de Conservação, como, por exemplo, a Área de Proteção Ambiental (APA) Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte na qual a barragem de rejeitos Maravilhas II está inserida.

Não obstante esses mecanismos de proteção legal, as bacias de rejeito de minério localizadas no alto rio das Velhas representam há várias décadas a maior ameaça ambiental não somente para a mais importante captação de água da concessionária Copasa (captação de Bela Fama, do Sistema Integrado Rio das Velhas para abastecimento de 70% da água de Belo Horizonte) como também para a manutenção direta dos serviços ecossistêmicos dessa região e indireta de todos os seus demais trechos a jusante, os quais alcançam o rio São Francisco no povoado de Guacuí (município de Várzea da Palma - MG). Todos esses atributos hidroambientais do alto rio das Velhas estão hoje ameaçados por dezenas de bacias de rejeitos de minério e inspiraram o desenvolvimento da metodologia aqui apresentada.

De acordo com Barreto (2001), alguns instrumentos são utilizados para minimizar os impactos causados por atividades econômicas consideradas tão impactantes e poluidoras como a mineração. Dentre estes, estão os instrumentos legais, apresentados durante a fase do licenciamento ambiental, e compostos pelo Estudo e Relatório de Impacto Ambiental, Plano de Controle Ambiental e Plano de Recuperação de Áreas Degradadas. Instrumentos econômicos também existem para tal, como por exemplo os incentivos e caução ambiental, além dos próprios instrumentos tecnológicos, como desenvolvimento de novas técnicas de extração, beneficiamento, armazenamento, somados com o desenvolvimento e aplicação de parâmetros ambientais.

Além disso, a fiscalização e o monitoramento constante das barragens de mineração poderiam evitar episódios como o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, da Mineradora Samarco S.A. (Vale S.A. e BHP Billiton), em Mariana, no estado de Minas Gerais, que causou dezenas de mortes, desemprego, danos sociais e incalculáveis impactos ambientais.

Contudo, segundo Nascimento *et al.* (2005), a legislação brasileira, apesar de muito ampla, sofre com deficiências que a deixam pouco ágil, devido às contumazes limitações financeiras, de pessoal e de agilidade gerencial, assim como meios para apurar os malefícios contra o meio ambiente. Uma alternativa viável para se contornar essa deficiência no cumprimento efetivo da legislação vigente seria um processo de monitoramento complementar àquele já efetuado pelos órgãos oficiais de fiscalização.

Uma das formas para se investigarem eventuais irregularidades das barragens de mineração, as quais

sempre se localizam em vales de bacias hidrográficas, seria pela verificação se os volumes das bacias de rejeito realmente correspondem às informações prestadas nos respectivos processos de Licenciamento Ambiental.

Em função desse contexto, o trabalho aqui apresentado demonstra como o uso de geotecnologias (por sensoriamento remoto) pode oferecer um instrumento técnico de monitoramento e fiscalização do volume de rejeitos presentes nas barragens de mineração e, dessa forma, contribuir para gestão do planejamento da minimização de impactos ambientais e riscos causados pela atividade minerária.

Assim, nesta pesquisa, através da aplicação das técnicas de geoprocessamento e de análise geomorfológica, elaborou-se, simultaneamente, uma metodologia independente para o cálculo desses volumes e a baixíssimos custos, de forma a se contornar sem maiores dificuldades a crescente deficiência técnica e de recursos humanos dos órgãos fiscalizadores sucateados do setor ambiental de Minas Gerais.

Sendo assim, esta pesquisa objetiva apresentar uma metodologia para o cálculo independente do volume de barragens de rejeitos, através de análise espaço-temporal, utilizando modelos digitais de elevação, ferramentas de análise geomorfológica e de geoprocessamento (análise geoespacial). De forma aplicada, propõe-se verificar a conformidade legal da barragem de rejeito de Maravilhas II, da mineradora Vale. S.A., com relação ao volume de armazenamento informado na documentação de seu Licenciamento Ambiental, e dessa forma, contribuir para gestão, monitoramento e planejamento da minimização de impactos ambientais e riscos causados pela mineração.

Modelos Digitais de Terreno (MDT)

O uso do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e a aplicação de sensoriamento remoto e seus métodos de análise espaço-temporal são de grande utilidade no monitoramento da alteração e expansão da paisagem, além da análise de velocidade de degradação dos recursos ambientais de uma região.

A caracterização da paisagem e a análise morfológica de um terreno vêm sendo muito aplicadas nas últimas décadas a partir de Modelos Digitais de Terreno (MDT), que são representações computacionais das formas do relevo da superfície terrestre, através do armazenamento de dados altimétricos (SALGADO *et al.*, 2011).

Para fins de diferenciação dos MDT, os Modelos Digitais de Elevação (MDE), representam as altitudes da superfície topográfica agregada aos elementos geográficos existentes sobre ela, como cobertura vegetal e edificações.

No processo de geração de um MDT, os modelos mais comumente usados são os de Grade Irregular Triangular e os de Grade Regular Retangular (MOORE et al., 1991).

O modelo *Triangular Irregular Network* (TIN) se caracteriza por ser uma estrutura composta por elementos triangulares, na qual os vértices são pontos da

amostragem, havendo distintos métodos para se proceder à triangulação. Os vértices representam um conjunto de localizações na superfície e normalmente incluem os que representam descontinuidades na inclinação do terreno, como picos, depressões, divisores de águas, vales e desfiladeiros (MAUNE et al., 2001).

A Grade Regular Retangular, por sua vez, possui uma estrutura matricial, com uma informação em cada cruzamento entre os eixos vertical e horizontal, de forma regular, sendo que o espaçamento entre duas posições da grade é constante na vertical e na horizontal (NAMIKAWA, 2003), ou seja, formando *pixels*.

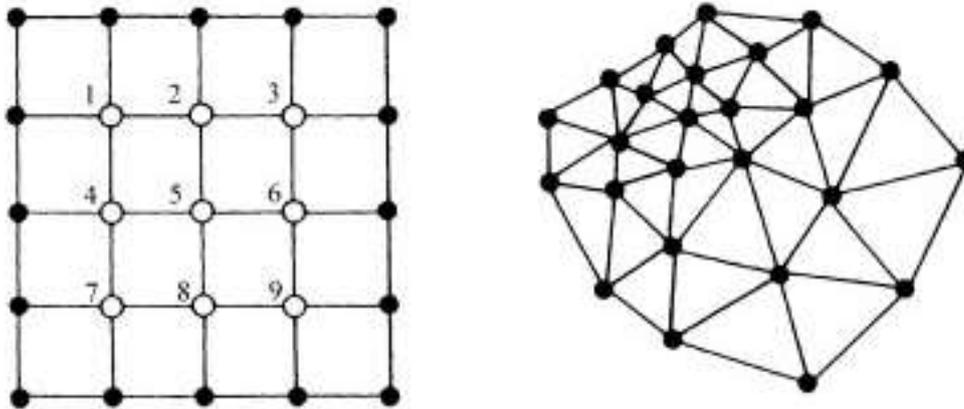


Figura 1 - Modelos Digitais de Terreno (Moore et al., 1991): Grade Regular Retangular (à esquerda) e Grade Irregular Triangular (à direita).

Sabe-se que quanto maior a resolução espacial, mais próximos da realidade serão os resultados. Contudo, no presente trabalho, os modelos digitais de terreno foram realizados em diferentes resoluções espaciais para fim de comparação dos resultados, sendo as resoluções utilizadas de 20m e de 1m.

Área de Estudo

A barragem de contenção de rejeitos Maravilhas II está localizada na porção noroeste do município de Itabirito, próximo ao limite com o município de Nova Lima, na região centro-sul do Estado de Minas Gerais e faz parte das estruturas da Mina do Pico (minério de ferro), integrante do Complexo Itabirito. Ela foi construída em 1994 pela empreendedora MBR – Minerações Brasileiras Reunidas S. A. e atualmente pertence à mineradora Vale S.A. (Figura 2).

Inserida no Córrego Sapocado, Maravilhas II possui como contribuintes os córregos Vargem do Pico (afluente esquerdo) e Lagoinha (afluente direito),

conforme ilustra a Figura 3. Esses corpos hídricos são tributários da bacia do rio do Peixe, afluente direto do rio das Velhas; esse último nasce no município de Ouro Preto e compõe a rede de drenagem de toda a região interna do Quadrilátero Ferrífero (alto rio das Velhas).

Materiais e Métodos

O presente trabalho consistiu em calcular o volume de rejeito da barragem Maravilhas II, através da análise geoespacial, comparando-se a topografia do terreno de 1997 (antes da construção da barragem) com aquela do ano de 2017.

O procedimento para determinar essas topografias contou com a geração dos modelos digitais de terreno (MDT), a qual foi realizada por duas metodologias: pelo modelo de Grade Irregular Triangular (TIN) e pelo modelo de Grade Regular Retangular. A execução desses dois procedimentos metodológicos visou uma análise comparativa dos resultados. Esses dados altimétricos foram processados pelas ferramentas do software ArcGIS versão 10.2.2.

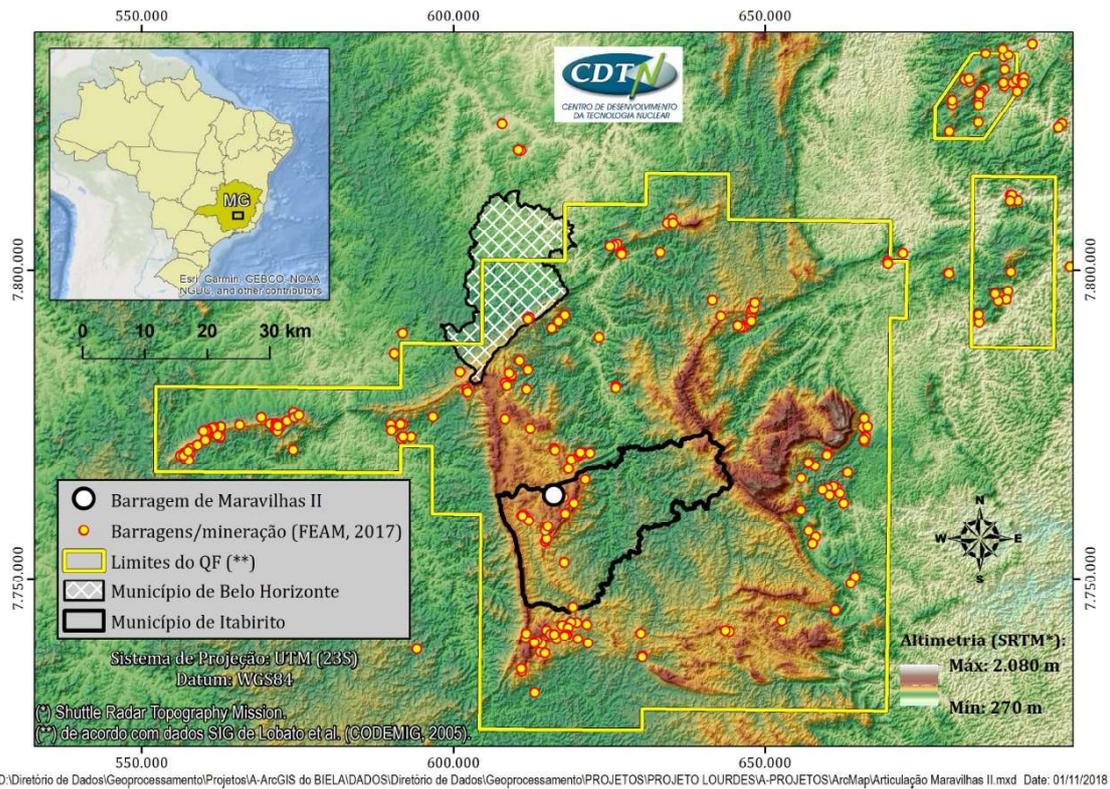


Figura 2 - Localização da barragem Maravilhas II sobre o mapa hipsométrico da região do Quadrilátero Ferrífero.

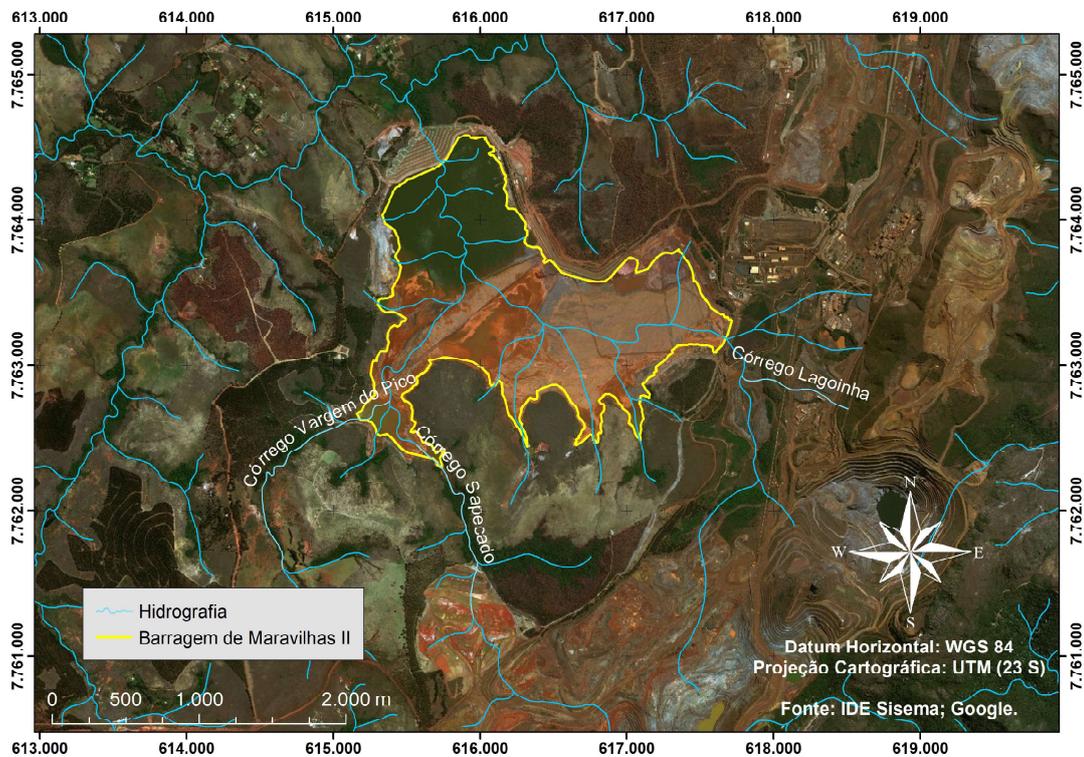


Figura 3 - Barragem Maravilhas II. Fonte: Google Earth Pro (2017).

O MDT da época anterior à construção da barragem (1994), por sua vez, foi obtido pela vetorização das curvas de nível das cartas topográficas de 1977, da Plambel (Planejamento da Região Metropolitana de Belo Horizonte), em escala de 1:25.000.

A partir destes dados, o volume já preenchido do reservatório em 2017 foi determinado pela subtração do (1) relevo da área preenchida até esse ano pelo (2) relevo do ano de 1977, ou seja, pelo relevo original (antes do início das atividades de extração mineral).

Imagens orbitais providas pelo Google Earth Pro

foram utilizadas para localizar os limites da barragem em 2017, a partir da identificação de um conjunto de pontos do terreno que definiram a borda da área preenchida por rejeitos, assim como aquela do seu barramento. Dessa forma, assumiu-se que o nível altimétrico superior de rejeito no reservatório nesse ano é dado pela cota dessa borda.

O Fluxograma da *Figura 4* apresente uma síntese da metodologia utilizada no presente trabalho. Nos itens seguintes, tem-se a descrição detalhada de cada procedimento.

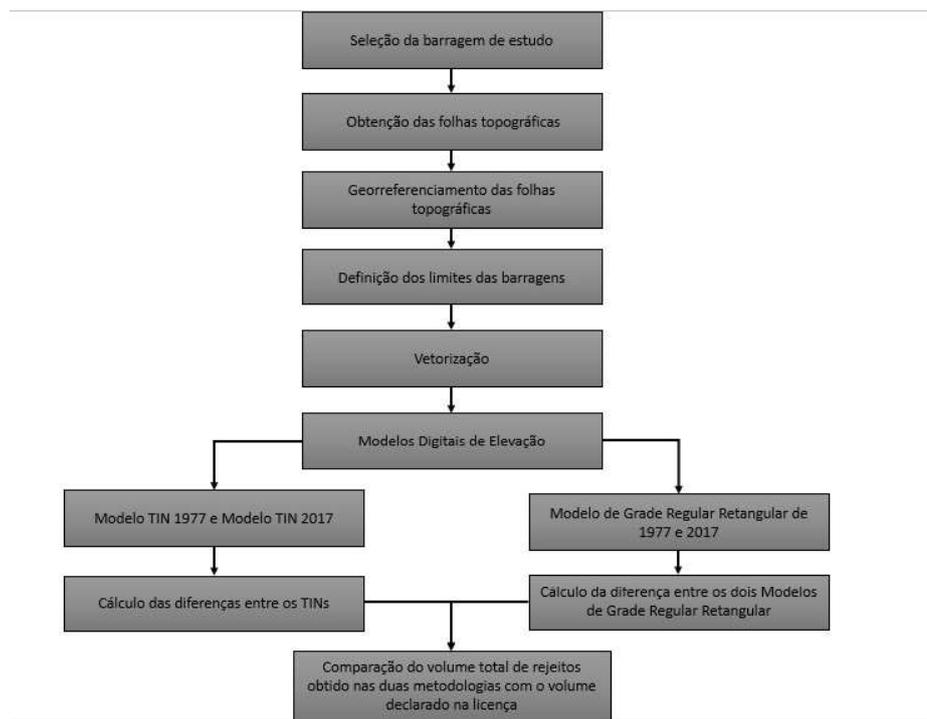


Figura 4 – Fluxograma das etapas metodológicas.

Por último, comparou-se o volume obtido pela metodologia aqui apresentada com o volume declarado pela mineradora, de forma a se verificar se o volume da barragem de rejeito realmente corresponde às informações prestadas nos respectivos processos de licenciamento ambiental.

5.1 Delimitação das bordas e do barramento da bacia de rejeito

Conforme mencionado anteriormente, a definição do relevo da área correspondente à barragem de Maravilhas II em 2017 teve como base as imagens do

Google Earth (*Figura 5*) quando foram identificados os pontos das margens da barragem assim como do seu barramento. Ou seja, identificou-se o conjunto de pontos que representa a região que está efetivamente preenchida por rejeitos e a partir da fotointerpretação da imagem utilizando-se recursos de desenho do software ArcGIS, foi possível vetorizar o contorno da barragem.

Após a conversão desses pontos para o formato *shape* (ferramenta *KML to layer*, do ArcGIS) foi necessário atribuir-lhes suas respectivas cotas altimétricas. Para os pontos da margem foi usada a ferramenta *Extract values to Point*, onde o raster altimétrico de referência usado foi aquele obtido através da vetorização das folhas da

Plambel, representando o relevo original (de 1977), ou seja, anterior ao início da operação da mina (em 1994).

Já para a altimetria dos pontos do barramento con-

siderou-se um valor suposto de elevação igual a 1.285 metros, que corresponde ao valor de altitude referente aos limites extremos do dique.



Figura 5 - Limite da Barragem Maravilhas II, definido por fotointerpretação a partir da imagem do Google Earth Pro (2017).

5.2 Elaboração dos MDT dos cenários de 1977 e 2017

A geração do relevo do período anterior às operações de extração mineral foi efetuada a partir das bases cartográficas das seguintes folhas da Plambel, do ano de 1977: folha Itabirito e folha Lagoa Grande, ambas na escala 1:25.000, datum horizontal Córrego Alegre, Sistema de Projeção UTM (Zona 23Sul) e com equidistância de 10 metros entre as curvas de nível.

Primeiramente, foi realizado o georreferenciamento dessas duas folhas a partir dos pontos de controle obtidos a partir de suas grades de coordenadas. Após o georreferenciamento das folhas iniciou-se o processo de vetorização. Para isso, foram criadas três camadas *shapfiles* que incluíram: Hidrografia (*shape-linha*), Curvas de Nível (*shape-linha*) e Pontos Cotados (*shape-ponto*).

Com base na delimitação da bacia de rejeitos na etapa anterior, procedeu-se à geração dos Modelos Digitais de Terreno de 1977 e 2017 a partir do método TIN e da Grade Regular, destacados a seguir.

Método TIN

O Fluxograma (*Figura 6*) resume as fases metodológicas para o cálculo do volume da barragem a partir do modelo TIN. Nos itens seguintes, tem-se a descrição mais detalhada da metodologia.

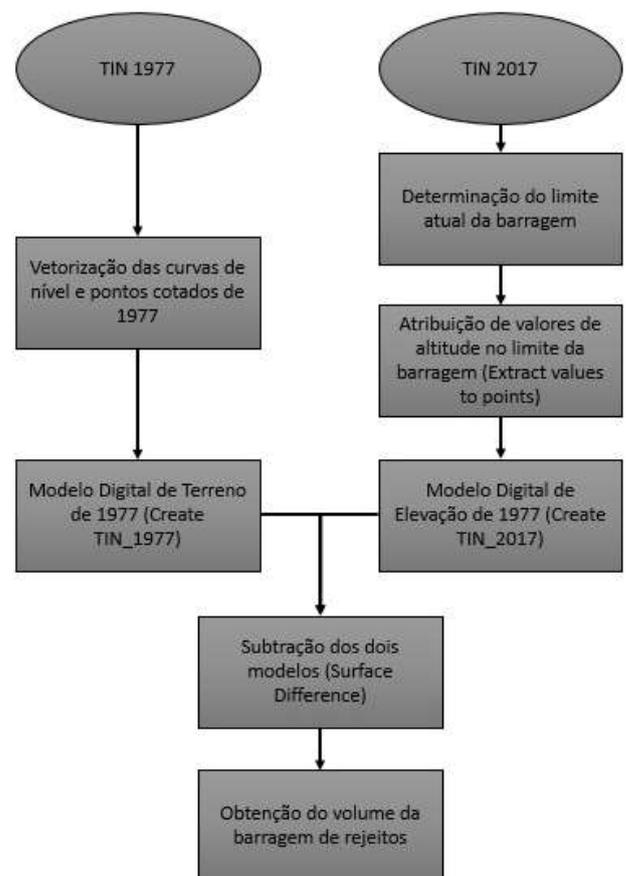


Figura 6 – Fluxograma com as etapas da metodologia TIN.

TIN

A partir dos vetores ‘curvas de nível’ e ‘pontos cotados’, gerou-se um modelo de grade irregular triangular representando o modelo digital de elevação de 1977, como é possível verificar na Figura 7, já convertido para o datum horizontal WGS84.

Em seguida, com o arquivo do limite da barragem com valores de altitude a ele já atribuídos, foi possível gerar o modelo digital de elevação atual (Figura 8). Dessa forma, o limite da barragem foi determinado por pontos que representam os vértices e, através deles, se procedeu à triangulação irregular.

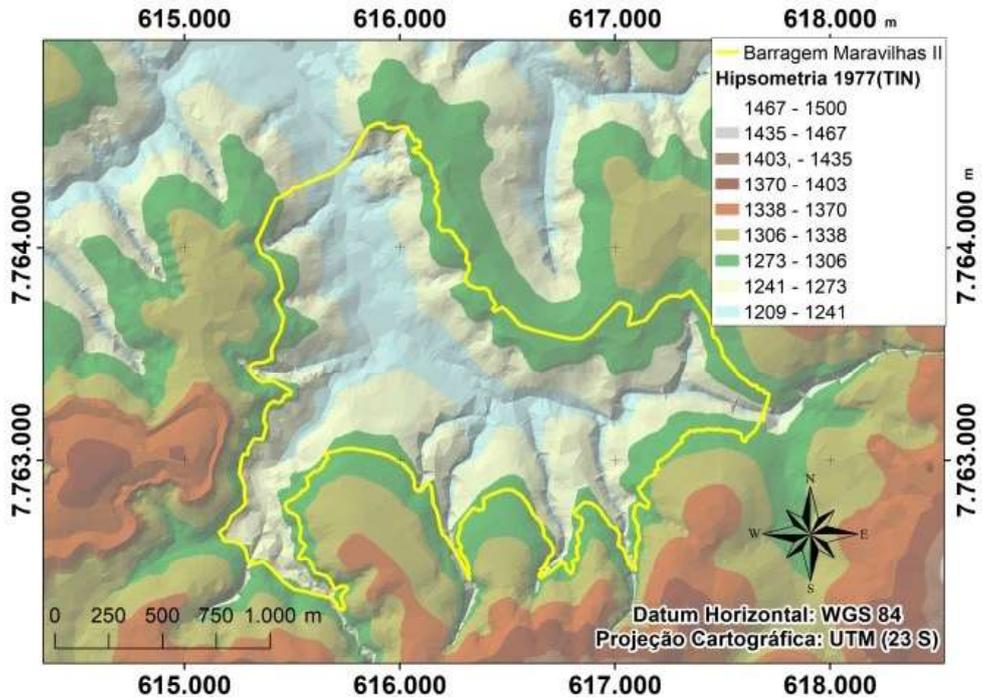


Figura 7 - Mapa hipsométrico de 1977 (TIN)

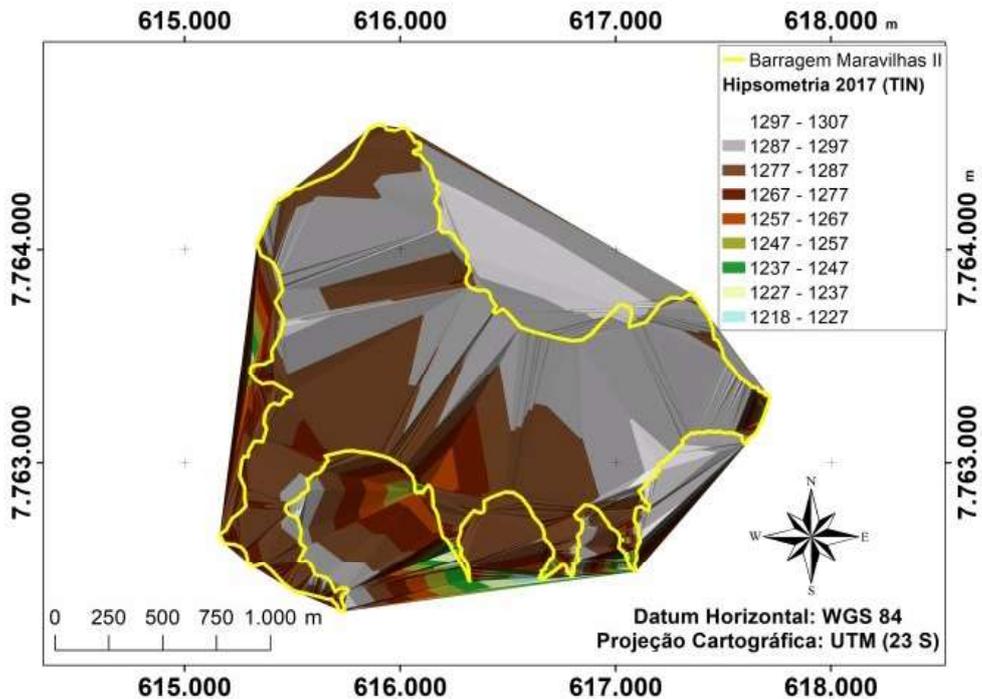


Figura 8 - Mapa hipsométrico de 2017 (TIN).

O procedimento de Grade Triangular Irregular gerou triângulos grandes na parte interna do limite da barragem, principalmente no modelo utilizando a distância entre os pontos do limite de 10m. Isso ocorreu, pois, a superfície da barragem é uma superfície aproximadamente horizontal e, segundo Maune *et al.* (2001), onde a superfície é mais plana, somente uma pequena quantidade de pontos é necessária e amostrada, fazendo com que os triângulos fiquem maiores. Onde há maior variação da altura da superfície, mais dados são coletados, resultando em um maior número de triângulos menores.

Método de Grade Regular Retangular

O Fluxograma da *Figura 9* ilustra a metodologia de cálculo do volume da barragem utilizando-se o modelo de Grade Regular Retangular.

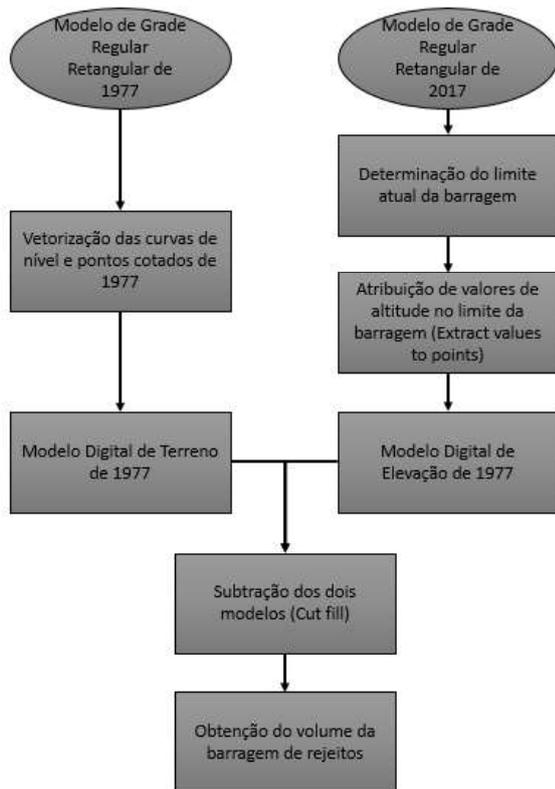


Figura 9 - Fluxograma com as etapas da metodologia de Grade Regular Retangular.

Modelo de Grade Regular Retangular

Para a geração do modelo de 1977 se utilizou a ferramenta *Topo to raster* do ArcGis, a partir dos vetores ‘curvas de nível’, ‘pontos cotados’ e ‘hidrografia’.

O modelo Topo to raster utilizado é um Modelo digital hidrológicamente consistente, que representa o relevo de forma fidedigna e assegura a convergência do escoamento superficial para a rede de drenagem mapeada, garantindo sua consistência hidrológica.

Os Modelos digitais hidrológicamente consistentes utilizam a malha hidrográfica durante o processo de interpolação dos dados apropriados de altimetria, para melhorar a definição do relevo ao longo da calha dos rios, assegurando-se a conectividade de todos os seus arcos, bem como a correta orientação no sentido do escoamento (Soares, *et al.*, 2011). O modelo digital de elevação de 1977 está representado na Figura 10.

O procedimento para gerar o MDT atual (*Figura 11*) foi repetido do mesmo modo que para aquele feito anteriormente para o método TIN. Entretanto, neste método, para determinar o conjunto de pontos no terreno atual, os valores do limite da barragem foram obtidos a partir do mapa hipsométrico de 1977, já gerado para o modelo de Grade Regular Retangular. Cálculo da diferença entre os MDT

Método TIN

Com os valores de altitude do relevo do vale de 1977, antes da construção da barragem (TIN antigo), e com os valores de altitude de 2017, depois de sua construção (TIN mais atual), pôde-se calcular a diferença entre os mesmos. O cálculo da diferença entre esses relevos foi realizado com a ferramenta *Surface difference* do ArcGis. Dessa forma, foi possível obter uma estimativa em metros cúbicos do volume total de rejeitos contidos na Barragem Maravilhas II. O procedimento foi efetuado para quatro cenários, com o limite da barragem progressivamente ajustado e com a distância entre os pontos do limite de 10 e 1m.

O limite da barragem foi ajustado, pois, a partir do primeiro cálculo da variação volumétrica de rejeitos (*Figura 12*), resultou um volume de rejeitos menor em parte do interior do limite da barragem. Ou seja, parte do interior do limite pré-estabelecido havia um volume menor em 2017 comparado ao de 1977. Pressupondo que dentro do limite da barragem sempre haveria de ter um volume maior em 2017 do que em 1977, o limite foi sendo ajustado ao resultado volumétrico.

Supôs-se que, ao ajustar o limite da barragem ao resultado anterior de cálculo de variação volumétrica, seria registrado um resultado mais próximo da realidade. Contudo, à medida que se ajustava o limite, novas áreas alteradas foram surgindo, nas quais o volume mais atual era menor que o volume antigo, mesmo dentro da barragem.

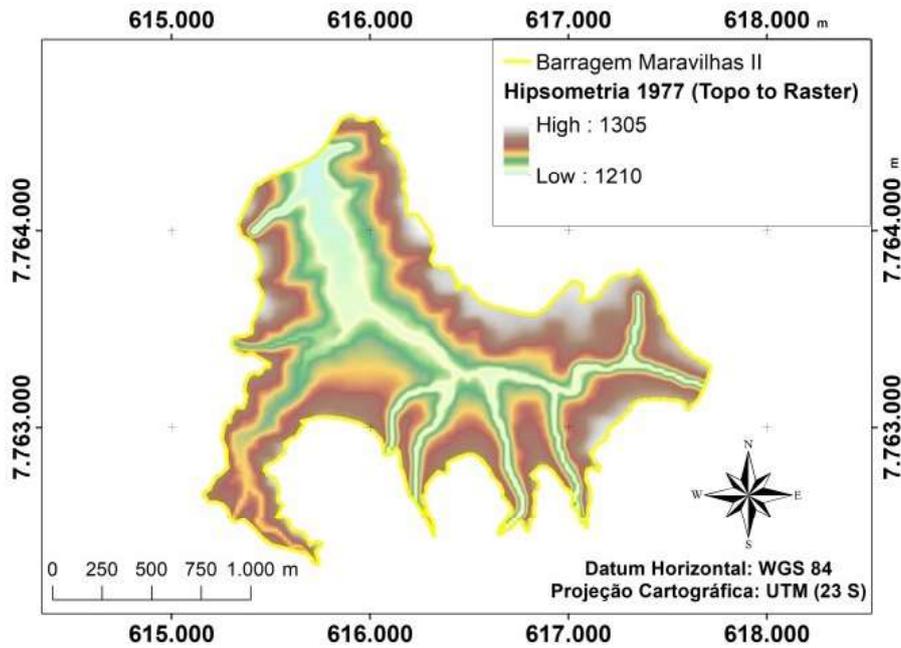


Figura 10 - Mapa Hipsométrico de 1977 (Modelo Regular Retangular).

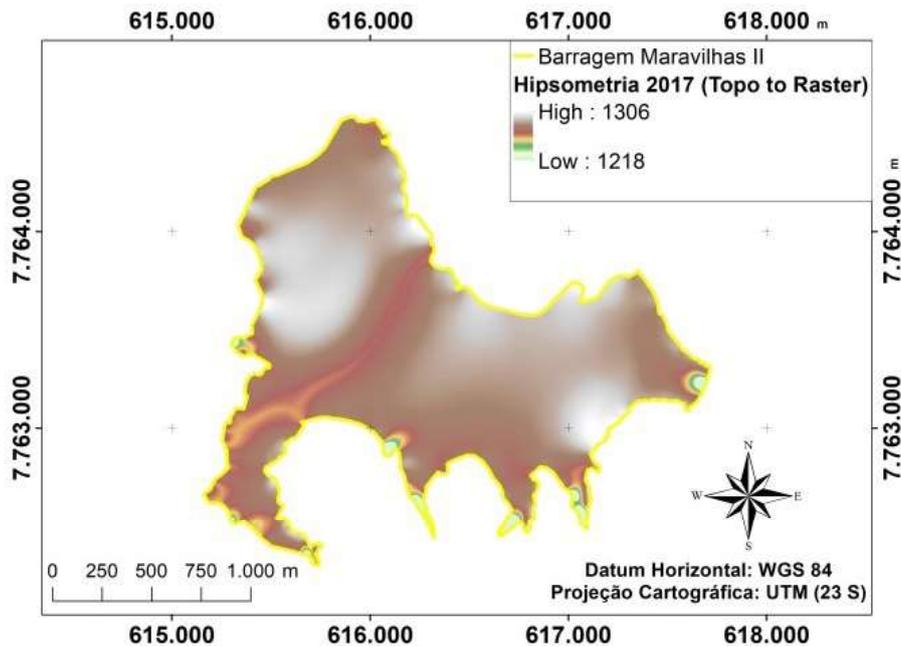


Figura 11 - Mapa Hipsométrico de 2017 (Modelo Regular Retangular).

O procedimento de cálculo feito pelo TIN resultou nos seguintes mapas: (1) com o limite da Barragem original (ou seja, o limite traçado primeiro através da imagem do Google Earth Pro) e distância entre os pontos do limite de 10m (Figura 12); (2) com o limite

reajustado e distância entre os pontos do limite de 10m (Figura 13); (3) com limite reajustado e a distância entre os pontos do limite de 1m (Figura 14) e; (4) com limite reajustado novamente e distância entre os pontos de 1m (Figura 15).

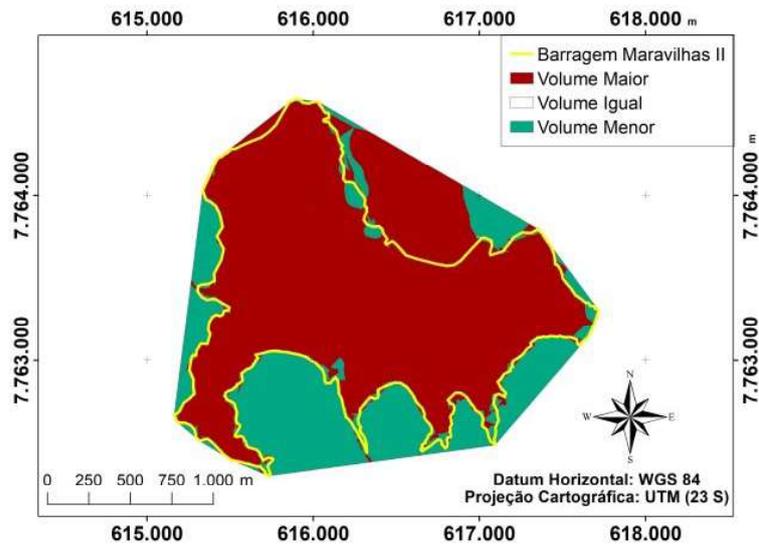


Figura 12 - Cálculo 1 - TIN - Diferença volumétrica com limite original e distância entre os pontos igual a 10m.

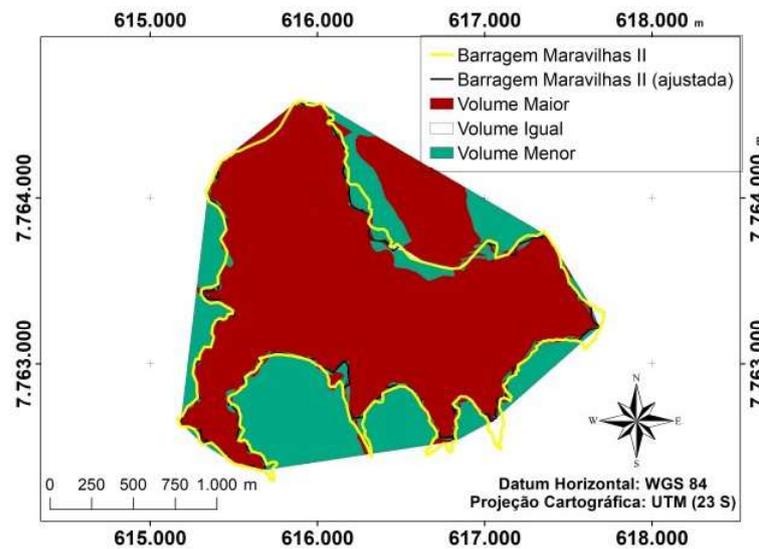


Figura 13 - Cálculo 2 - TIN – Diferença volumétrica, limite reajustado com distância entre os pontos de 10m.

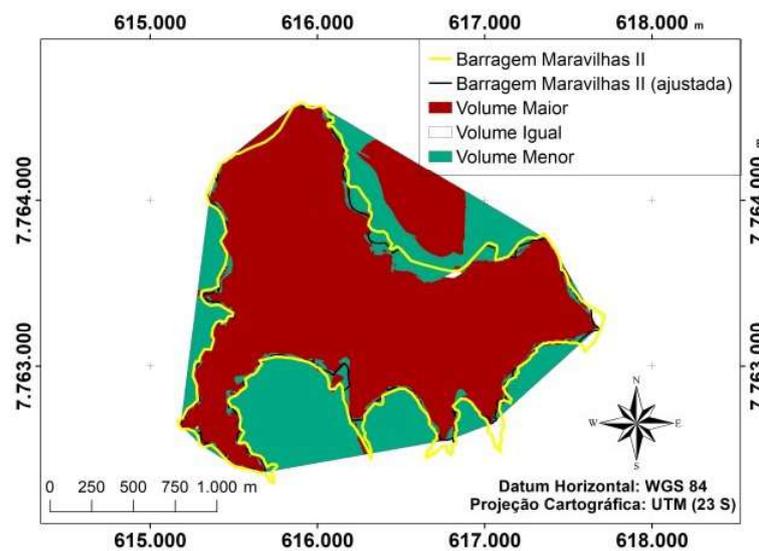


Figura 14 - Cálculo 3 - TIN – Diferença volumétrica com limite reajustado 2 e distância entre os pontos de 1m.

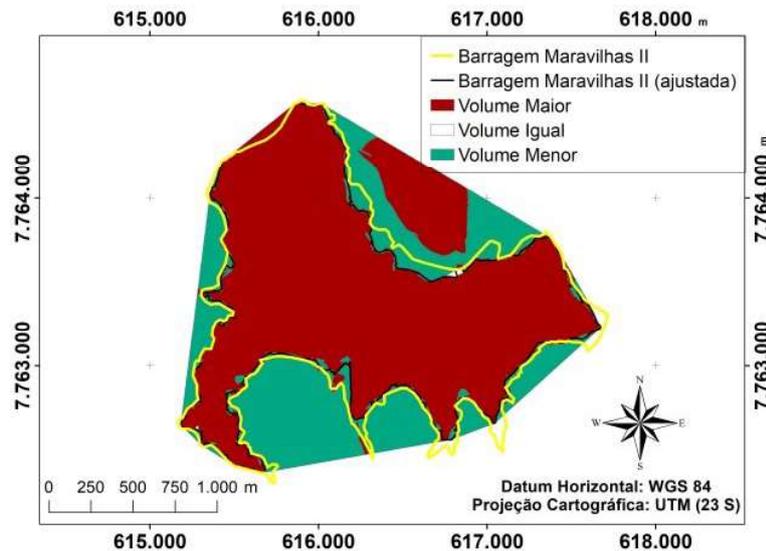


Figura 15 - Cálculo 4 - TIN – Diferença volumétrica com limite reajustado 3 e distância de 1m.

Os mapas de diferença volumétrica geraram três tipos de informações: representada pela cor avermelhada, foi identificada a área onde o relevo atual (2017) é mais elevado que o relevo antigo (1977); representado pela cor branca, onde o relevo atual e o relevo antigo são iguais, não havendo, portanto, alteração de volume entre os anos de 1977 e 2017; e na cor verde azulada, o relevo atual é mais baixo que o relevo antigo.

Esses resultados foram observados tanto no interior como no exterior dos limites da barragem. Contudo, considerando-se apenas os relevos internos ao limite da barragem, já que o processo de triangulação ocorreu com base no limite da barragem. Como o objetivo do trabalho foi calcular o volume da barragem, e não das alterações do seu entorno, foram desprezadas, portanto, todas as alterações externas à barragem.

Não se obteve, entretanto, o resultado esperado para essa metodologia, pois, como mencionado anteriormente, à medida que se ajustava o limite, novas áreas alteradas foram sempre surgindo, nas quais o volume mais recente era menor que o volume antigo, mesmo dentro da barragem. Portanto, esses procedimentos com TIN não puderam ser considerados coerentes por falta de convergência dos resultados. Além disso, arquivos TIN não permitem ser recortados apropriadamente, não sendo possível ajustar o mapa obtido a partir da definição dos limites da barragem.

Método de Grade Regular Retangular

Com os valores de altitude do relevo antes da construção da barragem de 1977 (*raster* antigo) e com os valores de altitude depois da construção da barragem de 2017 (*raster* mais atual), calculou-se a diferença entre eles através da ferramenta *Cut fill*. O procedimento também foi executado para diferentes cenários: (1) com o limite da barragem original (ou seja, o limite traçado primeiro através da imagem do Google Earth Pro), distância entre os pontos de 10m e pixel 20x20 (*Figura 16*); (2) com o limite reajustado, com a distância entre os pontos de 10m e pixel 20x20 (*Figura 17*) e; (3) com distância entre os pontos de 1m e com pixel de 1x1 (*Figura 18*).

Resultados e Discussões

O modelo de Grade Regular Retangular apresentou melhores resultados do que o método TIN, pois com a grade regular foi possível determinar o volume de rejeito contido exatamente dentro do limite da barragem, devido à possibilidade de seu recorte.

Complementarmente, a metodologia aqui aplicada ainda identificou áreas externas aos limites da barragem com relevo mais baixo que no seu interior, ou seja, foi capaz de definir áreas onde houve retirada de material durante a operação da barragem.

As Tabelas 1 e 2 mostram os resultados dos volumes obtidos para cada método e para cada limite traçado para a Barragem Maravilhas II, tanto pelo método TIN como pelo método de Grade Regular Retangular.

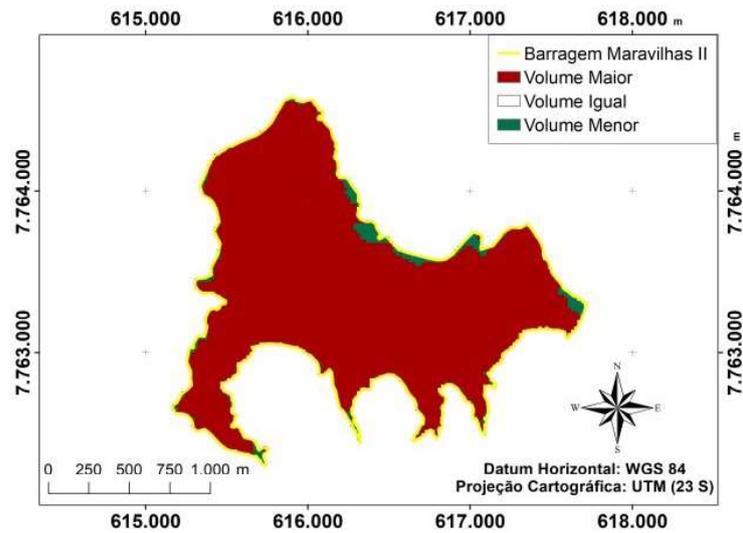


Figura 16 - Cálculo 5 - Topo to Raster.

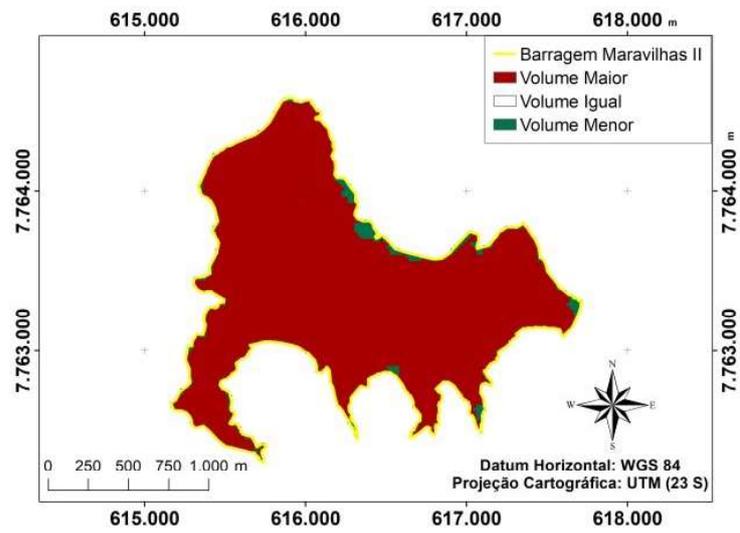


Figura 17 - Cálculo 6 - Topo to Raster.

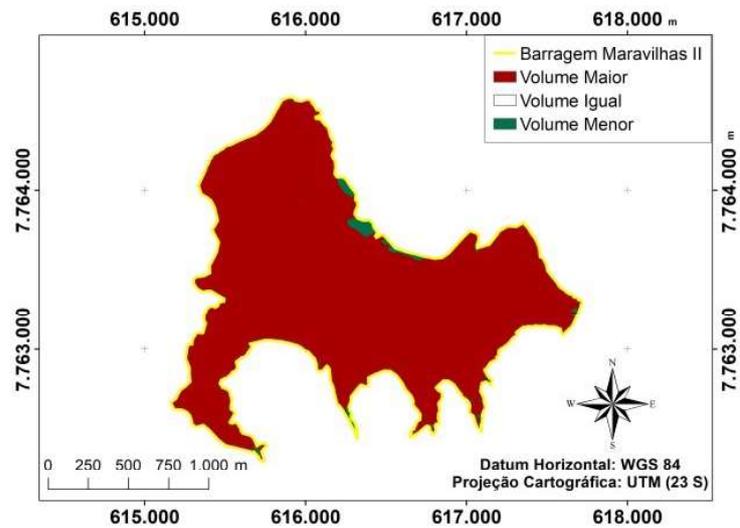


Figura 18 - Cálculo 7 - Topo to raster.

Tabela 1: Resultados TIN.

Cálculo	Figura	Volume (m ³)
1	Figura 12	88.847.310
2	Figura 13	81.880.661
3	Figura 14	71.606.915
4	Figura 15	71.445.331

Tabela 2: Resultados Grade Regular Retangular.

Cálculo	Figura	Volume (m ³)
5	Figura 12	81.311.825
6	Figura 13	78.787.535
7	Figura 14	74.366.813

Nota-se que, dos três processamentos (Tabela 2), os dois primeiros apontaram um volume muito superior ao terceiro. Isso ocorreu, pois, nos dois primeiros a resolução espacial utilizada foi de 20m, sendo muito menor do que a resolução do terceiro procedimento

(1m). Sendo o pixel da imagem com um tamanho maior (20m x 20m), ocorre de o resultado ser menos preciso do que o de um pixel de tamanho menor (1m x 1m). Isso significa que sua capacidade de registrar objetos (e consequentemente volumes) na superfície é menor.

Portanto, é de suma importância salientar que quanto maior a resolução espacial das imagens utilizadas na metodologia, melhor e mais preciso será o resultado.

Considerando (1) que o método de Grade Regular Retangular resultou no melhor método para a representação do volume da barragem; (2) que a distância de um metro entre os pontos do limite gera um detalhamento melhor da barragem do que com distância entre os pontos de 10m e; (3) que o pixel com tamanho de 1m x 1m assegura resolução melhor do que de 20m x 20m - o volume final com melhor resultado encontrado foi o do cálculo de número 7, com 74.366.813 m³ de volume de rejeito.

Sendo assim, o volume de rejeito da barragem Maravilhas II calculado, encontra-se até a data deste estudo em conformidade com a legislação ambiental, que prevê um volume máximo de 76.000.000 m³. Esse resultado é corroborado pelo processo de licenciamento ambiental encaminhando pela mineradora, em curso desde 2017, para a construção de uma nova barragem (Maravilhas III), devido ao iminente esgotamento de Maravilhas II.

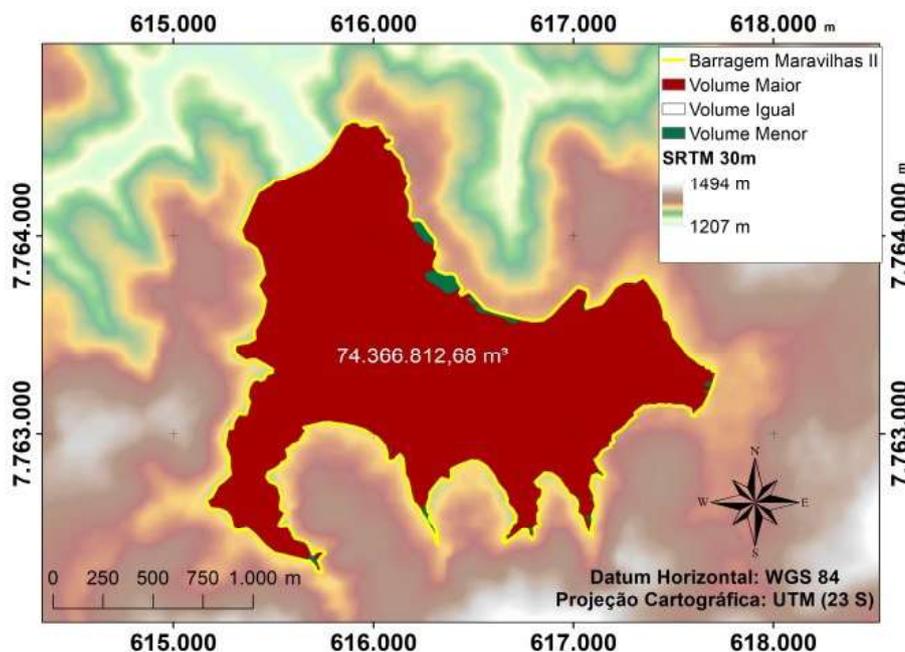


Figura 19 - Mapa Final de Volume da Barragem Maravilhas II.

Conclusão

Após o rompimento da barragem de rejeito da mineradora Samarco Mineração S.A. (Vale S.A./BH Billiton) em 5 de novembro de 2015, as atenções da população se voltaram para as fragilidades dos mecanismos de controle de barragens de mineração em Minas Gerais e para a necessidade de um melhor conhecimento da situação de todas as demais 424 barragens semelhantes, especialmente daquelas 307 localizadas no interior do Quadrilátero Ferrífero. Destacam-se aqui as 36 barragens com grande potencial poluidor a jusante da mais importante captação de água de abastecimento público da Copasa – captação de Bela Fama - responsável pelo abastecimento de 70% da população da capital do Estado.

Uma das formas de precaução de tragédias semelhantes é a investigação independente de eventuais irregularidades dessas estruturas por parte da população. O cálculo dos volumes declarados pelas mineradoras para as suas bacias de rejeito, as quais sempre ocupam vales de bacias hidrográficas, e a comparação se esses volumes realmente correspondem às informações prestadas nos respectivos processos de licenciamento ambiental, se mostram, portanto, como uma das formas mais precoces e necessárias de controle social.

No presente trabalho foi utilizada com sucesso uma metodologia que combina sensoriamento remoto e análise geomorfológica, e aplicada na investigação da barragem de Maravilhas II (Vale S.A.), localizada no município de Itabirito (Quadrilátero Ferrífero). Para isso, foi calculado o volume da sua bacia de rejeito através de subtração do Modelo Digital de Terreno (MDT) de 1977, ano anterior à da construção da barragem, pelo MDT de 2017, ano de desenvolvimento deste estudo.

Constatou-se que o melhor método de cálculo foi aquele a partir da geração dos MDT e baseados na construção de Grades Regulares Retangulares, chegando-se a uma estimativa de 74.366.813 m³.

Esse resultado se mostrou coerente, pois o volume máximo previsto para Maravilhas II, segundo dados de sua licença ambiental, era de 76.000.000 m³. Essa semelhança de volumes indica que a barragem estaria em vias de esgotamento, o que é confirmado pelo processo de licenciamento ambiental em curso no ano de 2016, quando a mineradora já solicitava a construção de uma nova barragem de rejeitos (Maravilhas III), justificando

que a de Maravilhas II, alvo deste estudo, logo esgotaria a sua capacidade máxima de armazenamento.

Assim, conclui-se também que a metodologia de subtração dos relevos de terreno de duas épocas diferentes para o cálculo do novo volume se mostrou eficiente e com precisão defensável para se investigar a validade dos dados de volume de barragem apresentados por empresas de mineração em seus processos de licenciamento ambiental.

No presente trabalho, portanto, foi desenvolvida uma metodologia de cálculo de estimativa de volumes de barragem de rejeitos, de forma independente e a baixíssimos custos, podendo ser utilizada pela população para conferência da veracidade dos dados fornecidos pelas mineradoras. Essa metodologia permite, assim, um maior controle dos volumes de rejeitos das barragens, contribuindo para o seu monitoramento com vistas a minimizar ou evitar, a tempo, possíveis impactos ambientais, sociais e econômicos, tão frequentemente causados pela atividade minerária em Minas Gerais.

Como restrições é importante salientar que a metodologia aqui desenvolvida demanda uma alta resolução espacial dos modelos digitais de terreno. A aplicação de diferentes resoluções espaciais demonstra que o tamanho do pixel utilizado resulta em uma considerável variação do volume final estimado.

Sugere-se, portanto, que para futuros trabalhos, seja utilizada uma resolução espacial melhor do que a de 1m, pois a existência de um modelo de melhor resolução espacial possivelmente definiria novos cenários e um resultado mais fidedigno à realidade.

Referências Bibliográficas

- ALBERTI, G. A. VICTORINO, H.S. Detecção da expansão da barragem de rejeitos Maravilhas II (MG) por Subtração Simples de Bandas e Análise de Componentes Principais - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos - SP, 2015. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE. p. 4883-4890.
- ArcGIS. Software ESRI Versão 10.2.2.
- BARRETO, M. L. **Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil**. Ed. III. Rio de Janeiro, 2001: 2015p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Informe Mineral**. Brasília: DNPM, 2014. ISSN 0101-2053.

- Fundação Biodiversitas. **Biodiversidade em Minas Gerais**. Segunda Edição. Belo Horizonte, 2005. 178p.
- Fundação Estadual de Meio Ambiente – FEAM. **Inventário de Barragem do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2013.
- GOOGLE. Google Earth Pro, 2017.
- LOBATO, L.M.; BALTAZAR, O.F.; REIS, L.B.; ACHTSCHIN, A.B.; BAARS, F.J.; TIMBÓ, M.A.; BERNI, G.V; MENDONÇA, B.R.V. de; FERREIRA, D.V. - **Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa**. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005. 68p.
- MAUNE, D.F.; J.B. MAITRA; E.J. McKay. **Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual** Editora D.F. Maune., American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD, 2001. 42p.
- MOORE, I.D.; GRAYSON, R.B. & LADSON, A.R. **Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications**. Hydrol. Proc., 5:3-30, 1991. DOI: 10.1002/hyp.3360050103.
- NAMIKAWA, L. M.; FELGUEIRAS, C. A.; MURA, J. C.; ROSIM, S.; LOPES, E. S. S.. **Modelagem numérica de terreno e aplicações**. INPE, São José dos Campos: Deposited in the URLib collection, 2003. INPE-9900-PUD/129.
- NASCIMENTO, M. C.; SOARES, V. P.; RIBEIRO, C. A. Á. S.; SILVA, E. **Delimitação automática de Áreas de Preservação Permanente (APP) e identificação de conflito de uso da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Alegre**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. Anais. São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2289-2296. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. DOI: 10.1590/1982-451320160304.
- REZENDE, V. L. **A mineração em minas gerais: uma análise de sua expansão e os impactos ambientais e sociais causados por décadas de exploração**. Sociedade e Natureza, vol.28, n.3, pp.375-384, 2016. ISSN 1982-4513.
- SALGADO, M. P. G. FORMAGGIO, A. R. RUDORFF, B. F. T. **Comparação entre métodos para geração de modelos digitais de elevação a partir de dados cartográficos**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.8880-8887. ISSN 1808-0936.
- SOARES, V. P., MOREIRA, A. A., RIBEIRO, C. A. A. S., GLERIANI, J. M., GRIPP JUNIOR, J., 2011. **Mapeamento de áreas de preservação permanentes e identificação dos conflitos legais de uso da terra na bacia hidrográfica do ribeirão São Bartolomeu – MG**. Revista Árvore, vol.35, n.3, pp.555-563, 2016 ISSN 0100-6762. DOI: 10.1590/S0100-67622011000300018.