



35^o
Bonito - MS

ANAIS do 35^o Congresso Brasileiro de Espeleologia
19 - 22 de julho de 2019 - ISSN 2178-2113 (online)



O artigo a seguir é parte integrando dos Anais do 35^o Congresso Brasileiro de Espeleologia disponível gratuitamente em www.cavernas.org.br.

Sugerimos a seguinte citação para este artigo:

SIMÕES, P.R. Levantamento fotogramétrico e modelagem 3D aplicados à cartografia espeleológica e à espeleometria da Gruta dos Fugitivos, Parque Estadual de Ibitipoca – MG. In: ZAMPAULO, R. A. (org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 35, 2019. Bonito. *Anais...* Campinas: SBE, 2019. p.229-237. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_229-237.pdf>. Acesso em: *data do acesso*.

Esta é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia.
Consulte outras obras disponíveis em www.cavernas.org.br

LEVANTAMENTO FOTOGRAMÉTRICO E MODELAGEM 3D APLICADOS À CARTOGRAFIA ESPELEOLÓGICA E À ESPELEOMETRIA DA GRUTA DOS FUGITIVOS, PARQUE ESTADUAL DE IBITIPOCA – MG.

*PHOTOGRAMMETRY AND 3D MODELING APPLIED TO CAVE MAPPING AND ESPELEOMETRY OF
FUGITIVES CAVE, IBITIPOCA STATE PARK, MINAS GERAIS, BRAZIL.*

Paulo Rodrigo SIMÕES

- (1) Rolling Drone Geotecnologias.
- (2) Sociedade Excursionista e Espeleológica – SEE.

Contato: prsimoes@yahoo.com.br.

Resumo

Nos últimos anos, a disponibilidade de novos instrumentos e funcionalidades, algoritmos e *softwares*, aliada ao incremento da capacidade computacional de processadores e de placas gráficas têm contribuído para a evolução da topografia e cartografia espeleológicas. A modelagem 3D através do perfilamento a laser e da Fotogrametria é tema de trabalhos recentes que apresentam os instrumentos e os procedimentos utilizados para mapeamentos de afloramentos, estruturas, indicadores cinemáticos e registro de arte rupestre, demonstrando o potencial de aplicações. A adoção desses métodos de levantamentos permite a geração de produtos como modelos digitais de superfície, mosaicos de ortofotos e modelos 3D realísticos, a automatização de tarefas e novas formas de análise e divulgação de resultados. Seguindo essa tendência, este trabalho apresenta a Fotogrametria enquanto ferramenta para a modelagem 3D, geração de mapa espeleológico e cálculos espeleométricos da Gruta dos Fugitivos, Parque Estadual de Ibitipoca. Apresenta, também, métodos, equipamentos, fluxo de trabalho e produtos gerados e discute sobre potencial e restrições na sua aplicação.

Palavras-Chave: fotogrametria; modelagem 3D; cartografia espeleológica; Parque Estadual de Ibitipoca.

Abstract

The availability of new instruments and functionalities, algorithms and software, coupled with the increase in the computational capacity of processors and graphics cards, have contributed to the evolution of caving topography and cartography in the last years. 3D modeling through laser scanner and Photogrammetry is the subject of recent work that presents the instruments and procedures used for mapping outcrops, structures, kinematic indicators and record of rock art, demonstrating the potential of applications. The adoption of these survey methods allows the generation of products such as digital surface models, orthophotos and realistic 3D models, besides the automation of tasks and new forms of analysis and divulgation of results. Following this trend, this work presents Photogrammetry as a tool for 3D modeling, cave mapping and speleometric data calculations of the Fugitive Cave, State Park of Ibitipoca. It also presents methods, equipment, workflow and products generated and discusses potential and constraints in its application.

Keywords: photogrammetry; 3D modelling; cave mapping; Ibitipoca State Park.

1. INTRODUÇÃO

A evolução recente de novas funcionalidades dos instrumentos de medição, disponibilidade de *software* e incremento da capacidade de processamento de microcomputadores tem contribuído para a cartografia digital espeleológica. O aumento da precisão, acurácia e agilidade nos levantamentos

convencionais e na elaboração de mapas espeleológicos vêm sendo obtidos com o uso de instrumentos como a trena a laser Disto-X. Já o uso do perfilamento a laser, enquanto método alternativo, permite a geração de modelos tridimensionais, potencializando novas formas de representação e análise, sendo de fácil divulgação via Web. Seu uso permite o cálculo de volume, variável espeleométrica de difícil obtenção por

método topográfico convencional. No Brasil, seu uso em cavidades remonta a 2001 com o perfilamento da entrada da Lapa Nova de Vazante realizado por uma mineradora, o que abriu discussões sobre nova graduação de topografia adotada pela UIS (Bittencourt, 2019. Com. pess.).

Apesar da relativa antiguidade do uso da Fotogrametria, seu potencial passou a ser melhor explorado nos últimos anos devido à popularização do uso de drones para aerolevantamentos e o incremento de *software* e algoritmos para modelamento 3D e classificação de imagens.

Fotogrametria pode ser entendida como a ciência e as tecnologias para a reconstrução do espaço tridimensional a partir de imagens bidimensionais.

Os estudos que abordam os métodos não convencionais de modelagem 3D de cavidades (scanner a laser e a Fotogrametria) são recentes, ainda incipientes, mas já permitem vislumbrar suas potencialidades. Estima-se que outros estudos importantes estão sendo executados em processos de licenciamento ambiental, no entanto, indisponíveis na Internet.

Redovniković *et alii* (2018) avaliaram a aplicação de diferentes métodos de levantamento subterrâneo através de estação total, Disto-X e fotogrametria, destacando as possibilidades de dificuldades de cada método.

Triantafyllou *et alii* (2019) destacaram o potencial da fotogrametria para o mapeamento 3D de afloramentos e estruturas geológicas e a combinação de levantamentos em solo e aéreos e apresentam um fluxo de trabalho, da aquisição de dados à caracterização de estruturas geológicas, sua geometria e os indicadores cinemáticos.

Grussenmeyer *et alii* (2010) realizaram modelagens 3D visando a obtenção de medidas sem contato da arte rupestre da caverna Les Faux, localizada na França, utilizando da fotogrametria, laser scanner e sistema de imageamento espacial por estação total. Jordan (2017) teve como objetivo averiguar em que condições a fotogrametria pode

ser usada para criar modelos 3D de cavidades, tanto quanto a avaliação da acurácia dos modelos gerados.

O objetivo deste trabalho é de apresentar os levantamentos fotogramétricos parciais realizados na Gruta dos Fugitivos (Figura 1) durante o 5º IbitiProCa e XII Expedição Ibitipoca da Sociedade Excursionista e Espeleológica – SEE, em parceria com a Rolling Drone Geotecnologias em janeiro de 2019.

Pretende, também, demonstrar a viabilidade deste método de levantamento para a geração de modelos digitais tridimensionais fotorrealísticos de alta resolução e como suporte à elaboração de mapas espeleológicos e a análises espeleométricas, tanto quanto discutir suas vantagens e dificuldades experimentadas durante os levantamentos.

Este trabalho não partiu de nenhum referencial teórico específico à elaboração de mapas espeleológicos a partir de levantamentos fotogramétricos em cavidades, dada a incipiência da bibliografia disponível. Partiu-se da experiência do autor no uso de Geotecnologias, em particular a Fotogrametria e a Topografia Digital convencional de cavidades, tendo realizado, de forma solitária, todos os procedimentos apresentados.

Os esforços empregados resultaram na proposição de uma metodologia alternativa de levantamento topográfico de cavidades naturais, com a definição de um fluxo de trabalho com procedimentos próprios aos levantamentos fotogramétricos, pós-processamentos e formas de divulgação dos mapas e análises produzidas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Fotogrametria voltada à espeleologia pode ser dividida em fases de planejamento, levantamento, pós-processamento, análise e divulgação dos dados, sintetizadas abaixo e foi aplicada em levantamentos parciais da Gruta Fugitivos e Gruta dos Moreiras, sendo apresentados os dados relativos à primeira. Para tanto, foi utilizada câmera digital Nikon P900, GPS Garmin Etrex 30, alvos codificados e trena a laser.



Figura 1: Mapa de localização da Gruta dos Fugitivos.

1 – Tomada das coordenadas UTM em um ponto na parte externa da cavidade a serem utilizadas como referência para a topografia convencional;

2 - Topografia espeleológica da cavidade ou de segmentos e inserção de *targets* codificados nas estações topográficas em pontos notáveis no piso e paredes; lançamento dos dados no *software* Compass, checagem de dados, correção de poligonais e atribuição das coordenadas UTM às estações; este procedimento foi substituído pela triangulação de três escalas medidas com tr

3 - Levantamento fotogramétrico da cavidade com câmera digital e flash ou sistema de iluminação com painel de LED com a utilização dos alvos codificados (*targets*);

4 – Pós-processamento das fotos no *software* Agisoft Metashape Pro na seguinte sequência: 1-alinhamento das fotos e geração dos *Tie Points*

(Figura 2); 2 - inserção dos pontos de controle (GCP's); 3 - otimização do alinhamento; 4 - geração de nuvem de pontos; 5 - geração de malha; 6 - geração de textura; 7 - geração de modelo digital de superfície; 8 – segregação de piso e de teto; 9 – geração de mosaicos de ortofotos do piso e do teto; 10 – exportação dos modelos;

5 - Extração automatizada dos contornos, cortes e perfis no *software* 3D Reshaper e curvas de nível no ArcGIS 10.6;

6 - Exportação dos vetores para o AutoCAD Map 3D: vetorizações de elementos espeleológicos sobre ortofotos, análises espeleométricas, geração de layout (Figuras 3 e 4);

7 - Publicação dos modelos 3D parciais da Gruta dos Fugitivos (<https://skfb.ly/6HNNG>) e da Gruta dos Moreiras (<https://skfb.ly/6IvFG>) no site Sketchfab.com.

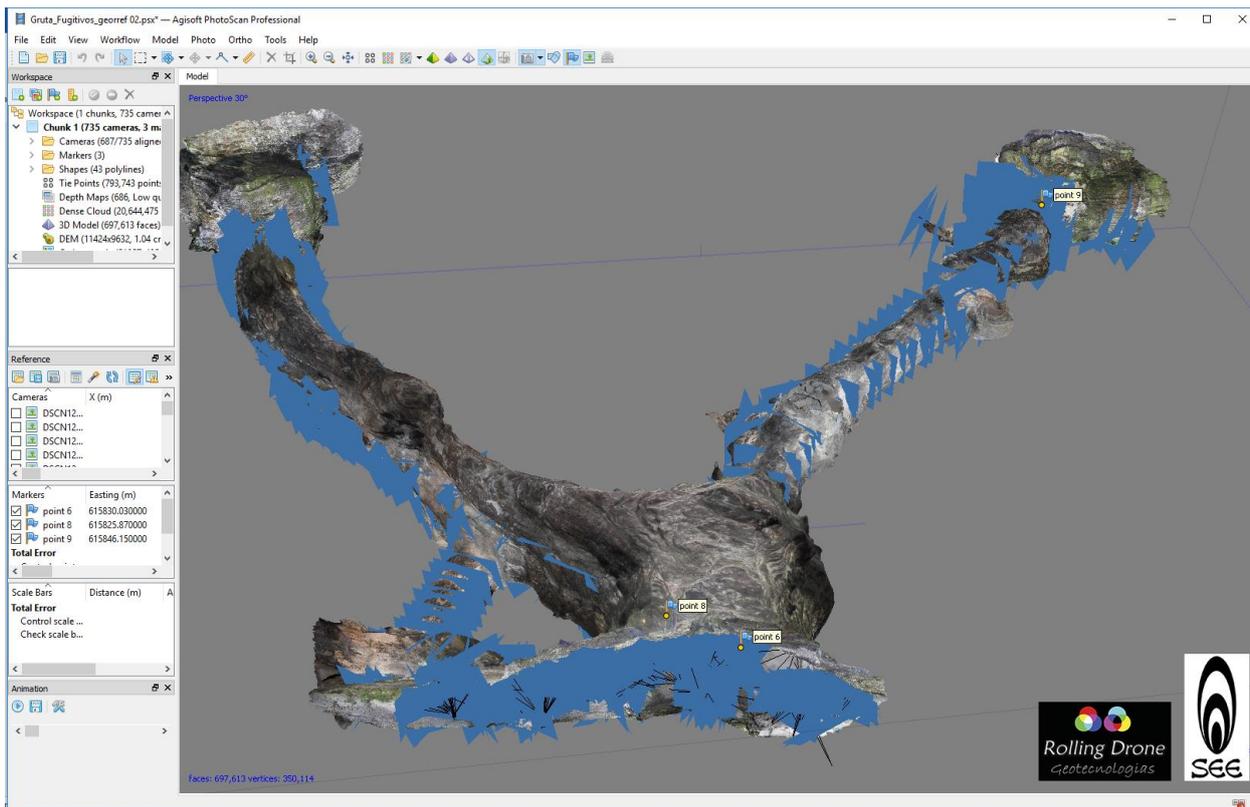


Figura 2: Localização e alinhamento das fotos (em azul) no software Agisoft Metashape Pro.

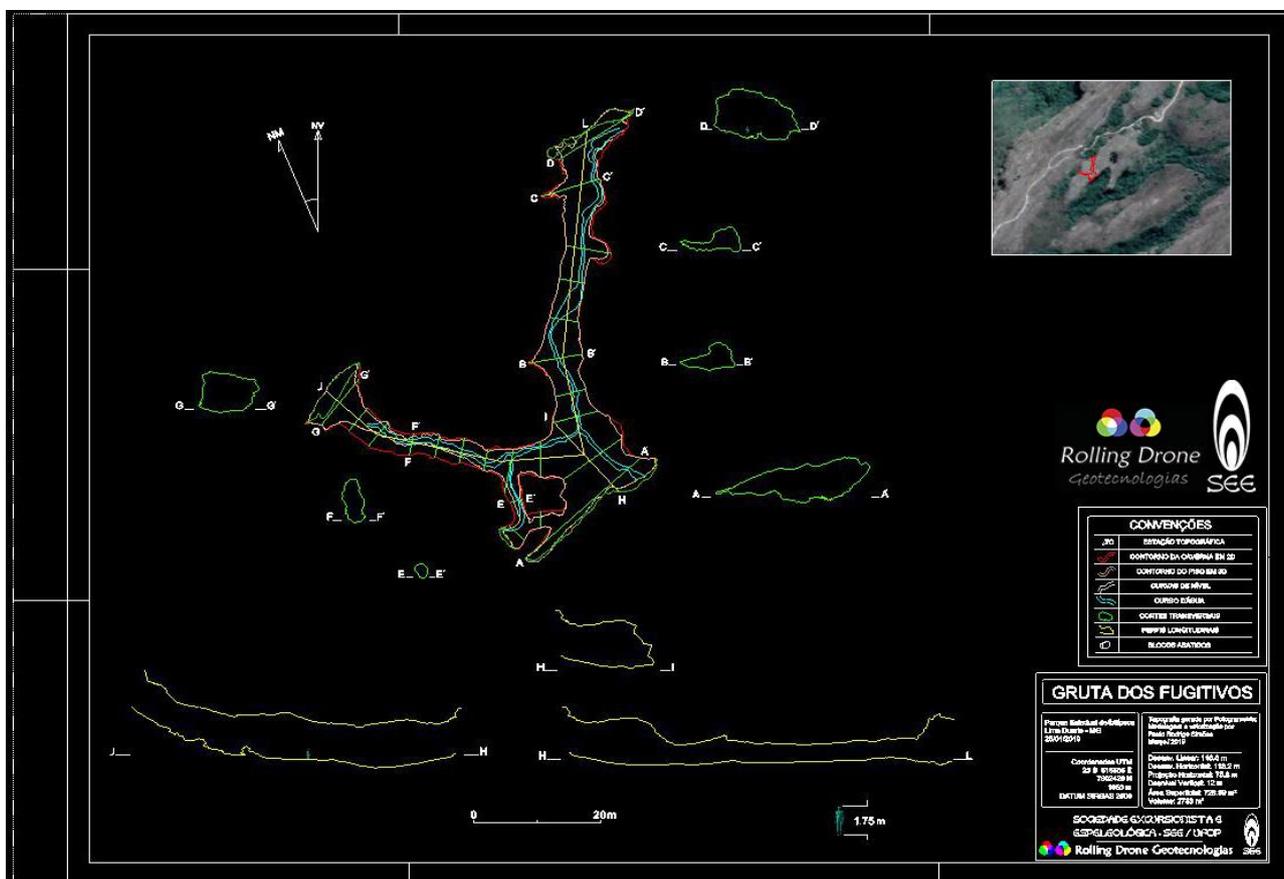


Figura 3: Edição de layout no AutoCAD Map 3D visto em planta.

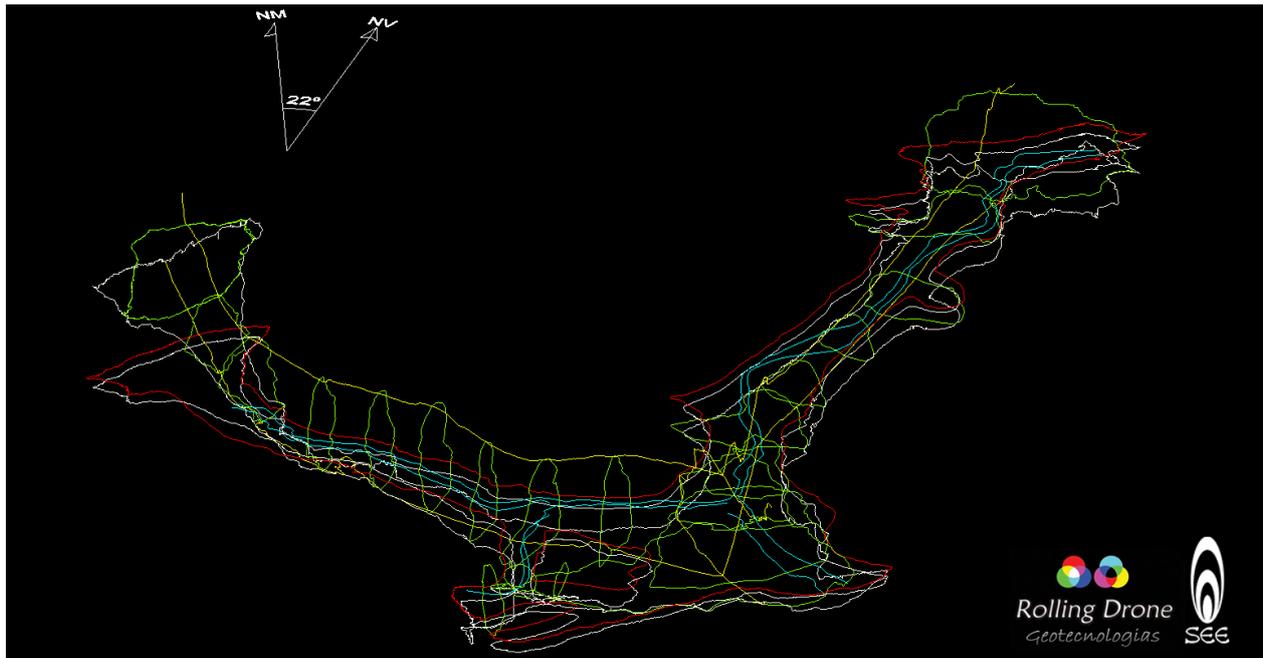


Figura 4: Perspectiva isométrica da cavidade com destaque para os vetores extraídos automaticamente no 3DReshaper.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados são parciais e preliminares e devem ser avaliados com precaução. No entanto, a sobreposição do modelo ao mapa da cavidade feito pelo GPME e GBPE (Silva, 2004) (Figura 5) foi um primeiro esforço para avaliar a precisão relativa ao menos em planta, tendo apresentado variação no desnível.

Os levantamentos realizados resultaram em modelos 3D fotorrealísticos, de alta resolução, com ortofotos com GSD de 1.3 mm/pixel e modelo digital de superfície com 1 cm/pixel, permitindo usar o valor de até 1:20 como escala de trabalho nos procedimentos de vetorização dos detalhes de piso e teto.

O levantamento fotográfico da cavidade foi feito entre as 10h e 12h do dia 25 de janeiro de 2019, incluído aí o tempo para posicionamento e medição dos pontos de controle. Este levantamento foi interrompido pelo esgotamento da bateria da câmera, acelerado pelo uso contínuo do *flash*.

As atividades de pós-processamento foram realizadas em etapas sequenciais: geração do modelo fotogramétrico, extração vetorial automática e geração de *layout*. A geração do modelo é a etapa mais demorada e dependerá do número de fotos, da capacidade computacional e das configurações adotadas em função da resolução esperada.

Os processamentos para a geração do modelo da Gruta dos Fugitivos resultaram numa nuvem de 20.644.475 pontos, 700.190 faces, tendo sido utilizadas as 687 fotos alinhadas de um total de 729, equivalente a 94.2%. Inicialmente apenas em escala, seu posicionamento e rotação foram corrigidos com o auxílio de coordenadas externas a partir da topografia da cavidade (Silva, 2004) (Figura 5). Além do modelo 3D da cavidade, foi feito um modelo apenas do piso, resultando em um segundo mosaico de ortofotos, modelo de superfície e curvas de nível.

A partir destes dois modelos foi possível realizar a extração automática de vetores do contorno da cavidade em 2D, contornos do piso em 2D e em 3D, cortes transversais e perfis longitudinais e extraídas as curvas de nível. Estima-se em cerca de 12h o tempo necessário para realizar todas as etapas para a geração do modelo fotogramétrico, valor apenas de referência, uma vez que os procedimentos não foram feitos de forma sistemática (Figura 4).

Outros elementos como blocos, espeleotemas, delimitação de drenagens, são também vetorizados nesta etapa.

Para tanto, foi utilizado o *software* 3DReshaper, com destaque para a interoperabilidade para com o AutoCAD Map 3D, ambos amplamente utilizados na manipulação

de modelos gerados por escaneamentos a laser. Foram gastas pelo menos 6h com esses procedimentos, refeitos várias vezes na tentativa de obtenção de melhores resultados.

A geração de *layouts* foi feita através do ArcGIS 10.6 e AutoCAD Map 3D. O primeiro tem a vantagem de articular a cavidade à sua localização sobre imagem de satélite (Figura 1), assim como demais planos de informações disponíveis, em 2D e em 3D. Este procedimento permitiu corrigir o posicionamento geográfico e a rotação do mapa existente, não declinado.

Na segunda opção, alia-se a visualização um mapa convencional em planta, às possibilidades de rotação e navegação em 3D, passível de divulgação *on line* (Figura 3).

O resultado é um arquivo em formato DWG, contendo: mosaicos de ortofotos do piso e do teto; curvas de nível do piso; *meshs* dos modelos do piso e da cavidade; limites do piso em 2D e 3D, limites da cavidade em 2D; cortes transversais; perfis longitudinais; cursos d'água; e blocos. O tempo gasto para a geração dos *layouts* foi de cerca de 6h.

Por fim, foi feita a publicação do modelo 3D parcial da Gruta dos Fugitivos (<https://skfb.ly/6J8Rt>), em um repositório *on line* (www.sketchfab.com) onde é possível navegar e visualizar o mapa vetorial em diversos ângulos. Este procedimento, aparentemente o mais simples, resultou em intermináveis tentativas em *uploads* e na conformação de entidades gráficas no AutoCAD. Os erros sucessivos são, possivelmente, relativos a restrições da página no que se refere aos formatos de *upload* disponíveis para usuários "free".

Em termos de valores espeleométricos parciais obtidos, a Gruta dos Fugitivos se projeta horizontalmente sobre uma área de 728,4m², tendo seu piso uma área de 627,4m² e volume de 2.733m³. Seu desenvolvimento horizontal pelo método de descontinuidade foi de 116.6 m e seu desenvolvimento linear foi de 118.2 m, calculado com o auxílio das curvas de nível. O desnível do piso foi de 12 m, das cotas 1645.8 m a 1657.8 m, representado por curvas de nível com equidistância de 5 cm.

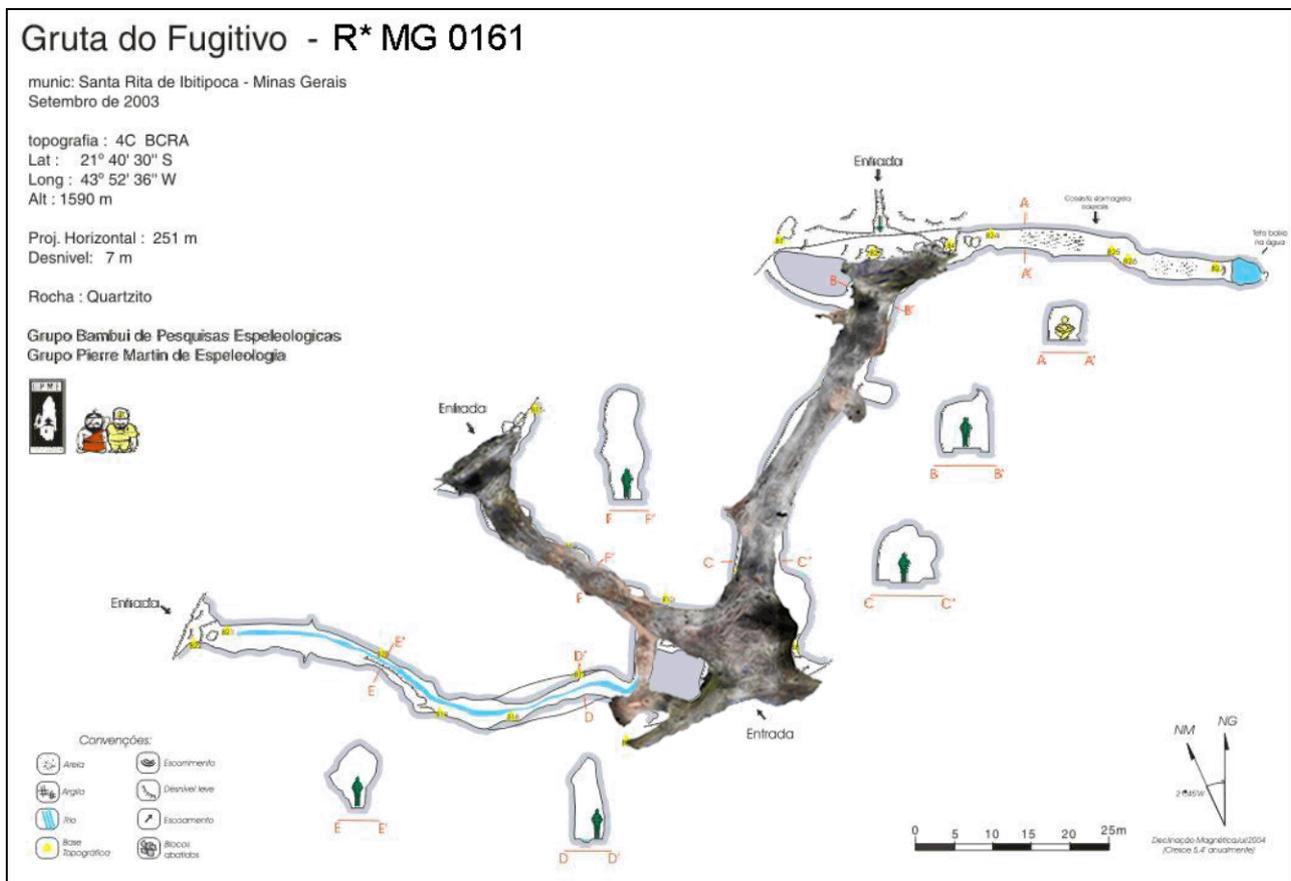


Figura 5: Sobreposição do mosaico de ortofotos do piso da Gruta dos Fugitivos sobre o mapa elaborado pelo GPME/GBPE (Modificado de Silva, 2004).

4. CONCLUSÕES

Este trabalho procurou demonstrar a viabilidade da aplicação da Fotogrametria a levantamentos de cavidades naturais, no que se refere ao tempo relativamente baixo empregado nos levantamentos fotográficos e topográficos, aos custos relativamente baixos para aquisição de equipamentos fotográficos, instrumentos e licenças educacionais de *software*.

Seu uso cobre uma lacuna ente os levantamentos topográficos convencionais e os dispendiosos levantamentos a laser. Ressalta-se também o fato de não ser susceptível à interferência magnética, própria de cavidades em formações ferríferas. É, também, uma contribuição à proposição de um fluxo de trabalho para geração de modelos 3D de cavidades a partir da Fotogrametria e à construção de mapas espeleológicos a partir destes.

Os modelos 3D apresentaram rigor geométrico e textura realística, particularmente úteis em processos de documentação visual e monitoramento. Seu uso permitiu a automatização de processos e novas formas de visualização, análise e divulgação na Web de vídeos de animações, de

PDF 3D, de arquivos KML e KMZ e modelos navegáveis (Figura 6).

O suporte de pontos de controle através de topografia convencional contribui para o georreferenciamento do modelo 3D pela inserção de coordenadas UTM, obtidas por GNSS na entrada da cavidade e tratadas no *software* Compass, vindo a apresentar o erro médio decorrente. Este procedimento não foi realizado nesta cavidade, substituído pela triangulação de três escalas utilizadas apenas no salão principal, rotacionado e georreferenciado na sequência. A acurácia no posicionamento dos GCP's foi de 15 cm.

O uso da Fotogrametria na cartografia espeleológica e nos cálculos espeleométricos permite a geração de produtos mais precisos do que os métodos convencionais, sendo mais acessível, de maior portabilidade e de menor custo, quando comparado ao perfilamento a laser.

No entanto, a utilização deste método pode não se mostrar eficaz em cavidades com grande desenvolvimento ou de difícil deslocamento, em entradas com vegetação expressiva, ou com a existência de extensos corpos d'água, entre outras particularidades.

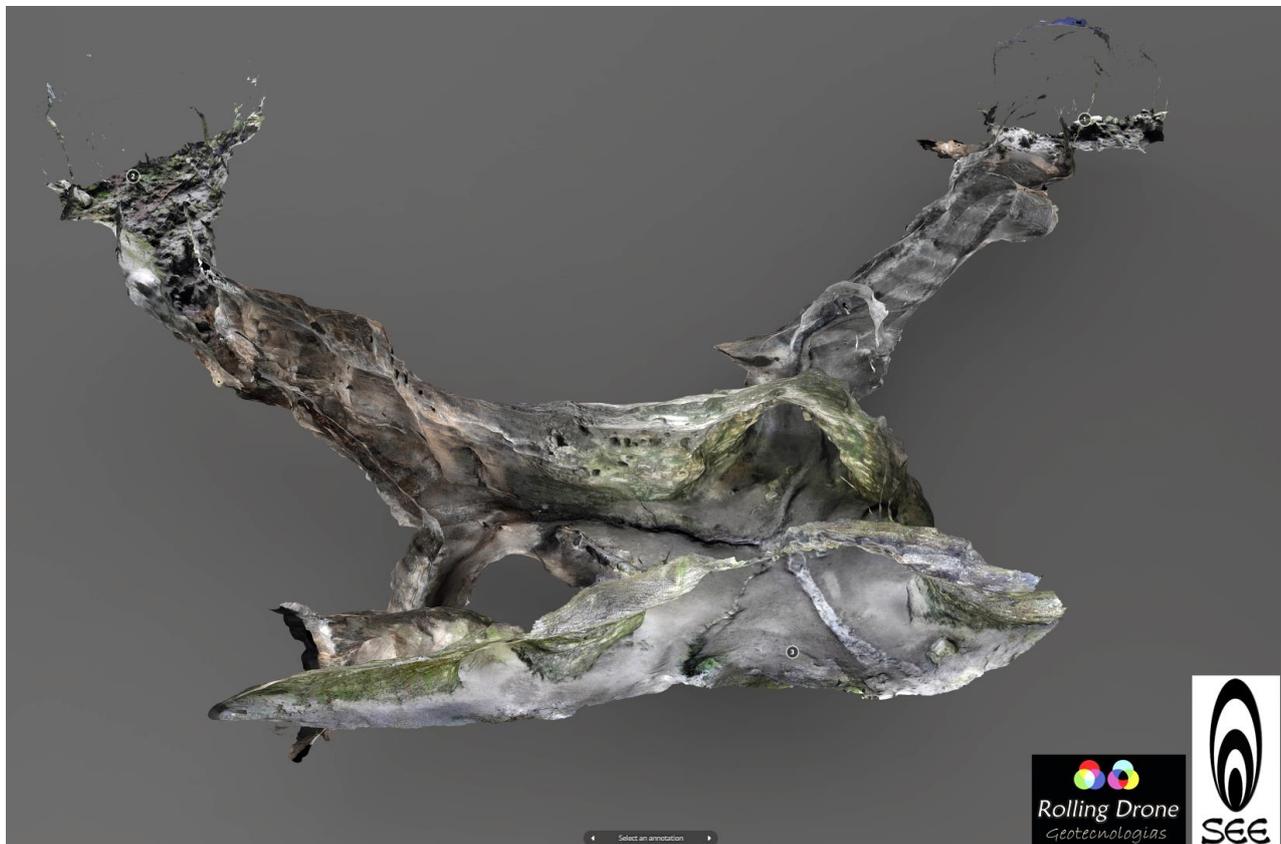


Figura 6: Modelo 3D navegável hospedado na página [Sketchfab.com](https://sketchfab.com).

Pretende-se finalizar o levantamento desta cavidade e estender a aplicação deste método sua vizinha, a Gruta Três Arcos, tanto quanto a outras grutas turísticas. Ressalta-se que os procedimentos adotados permitem também a junção de levantamentos em solo a levantamentos aéreos com drone em áreas externas, integrando os meios epígeo e hipógeo.

A continuidade no uso deste método de levantamento pressupõe, também, possíveis aprimoramentos no fluxo de trabalho, tanto quanto na avaliação do posicionamento espacial, do rigor geométrico dos modelos 3D gerados e em formas de

comparação com outros métodos disponíveis, convencionais ou a laser.

5. AGRADECIMENTOS

À Sociedade Excursionista e Espeleológica – SEE/UFOP, à Rolling Drone Geotecnologias, à direção do Parque Estadual do Ibitipoca pelo apoio aos projetos, à Sociedade Carioca de Pesquisas Espeleológicas - SPEC, à Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, à Autodesk, Agisoft, Fountainware e Hexagon pela disponibilização de licenças *freeware*, educacional e temporária dos softwares.

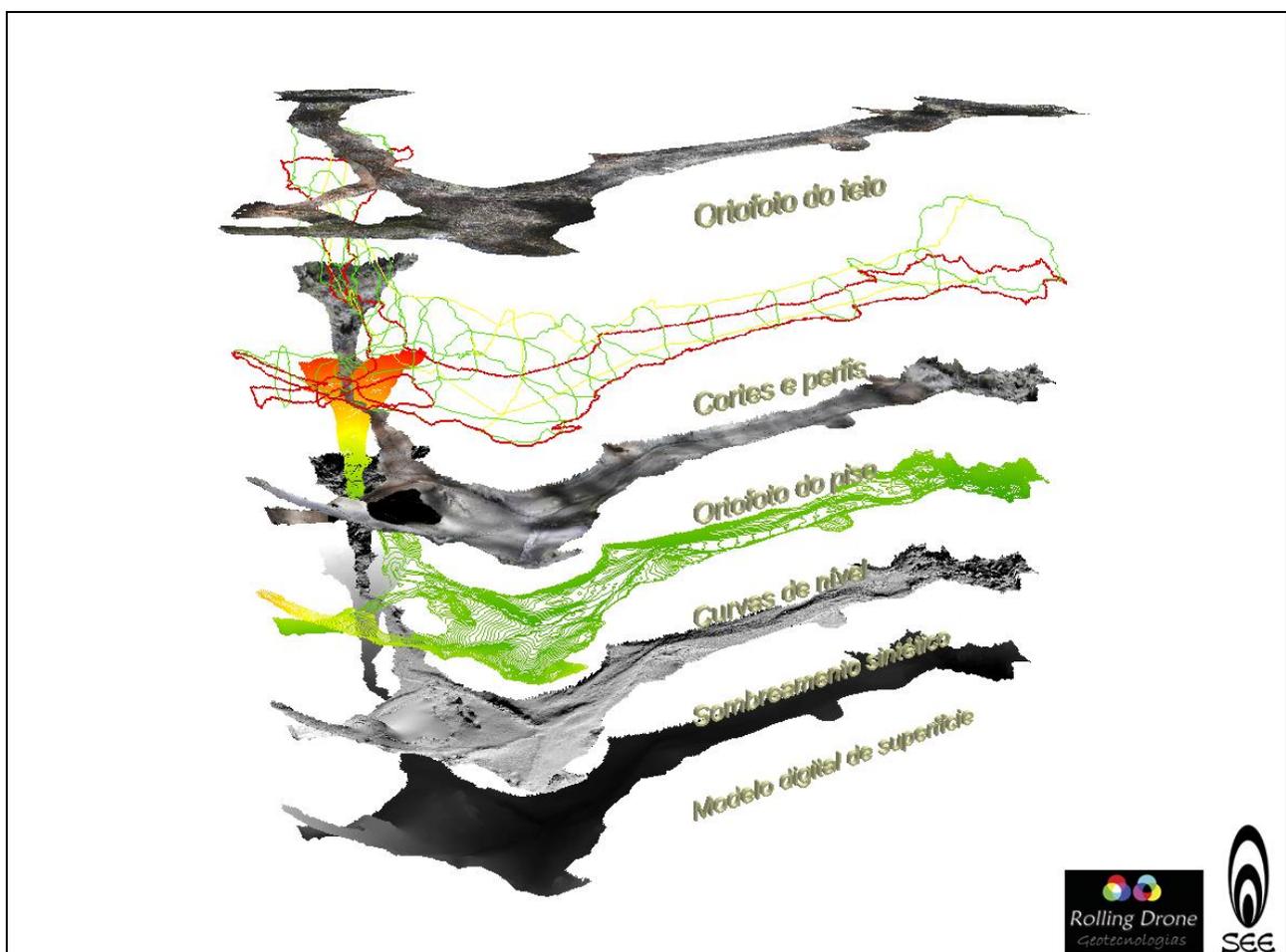


Figura 7: Representação de produtos gerados em perspectiva isométrica: ortofoto do teto, cortes e perfis, limites da cavidade, ortofotos do piso, curvas de nível, sombreamento sintético e modelo digital de superfície.

BIBLIOGRAFIA

- ARAÚJO, R. N. (2016) **Levantamento de Parâmetros Geomecânicos de uma Caverna Natural Subterrânea Utilizando Tecnologias de Laser Scanner 3D e Realidade Virtual**. Dissertação de Mestrado. UFOP.
- GRUSSENMEYER, P.; LANDES, T.; ALBY, E.; CAROZZAB, L. (2010) **High resolution 3d recording and modelling of the bronze age cave “Les Fraux” in perigord (France)**. *In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5. Commission V Symposium, Newcastle Upon Tyne, UK.
- JORDAN, J. H. (2017) **Modeling Ozark Caves with Structure-fromMotion Photogrammetry: An Assessment of Stand-Alone Photogrammetry for 3-Dimensional Cave Survey**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Arkansas.
- REDOVNIKOVIC, L.; STANČIĆ, B., CETL, V. (2016) **Comparison of Different Methods of Underground Survey**. *In: International Symposium on Engineering Geodesy*, 20–22 May, Varaždin, Croatia.
- SILVA, A. M. (2004). **Carstificação em rochas siliciclásticas: Estudo de caso na Serra do Ibitipoca, Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado. UFMG, 137 p.
- TRIANAFYLLOU, A.; WATLET, A.; MOUÉLIC, S.; CAMELBEECK, T.; CIVET, F.; OLIVIER, K.; QUINIF, Y.; VANDYCKE, S. (2019). 3-D digital outcrop model for analysis of brittle deformation and lithological mapping (Lorette Cave, Belgium). *In: Journal of Structural Geology*. 120. P. 55-66.