



35<sup>o</sup>  
Bonito - MS

ANAIS do 35<sup>o</sup> 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<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Espeleologia disponível gratuitamente em [www.cavernas.org.br](http://www.cavernas.org.br).

Sugerimos a seguinte citação para este artigo:

GROHMANN, C.H. et al. Mapeamento e modelagem 3D do setor turístico da Caverna do Diabo (SP) com laser scanner: resultados preliminares. In: ZAMPAULO, R. A. (org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 35, 2019. Bonito. *Anais...* Campinas: SBE, 2019. p.201-206. Disponível em: <[http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe\\_201-206.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_201-206.pdf)>. Acesso em: *data do acesso*.

Esta é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia.  
Consulte outras obras disponíveis em [www.cavernas.org.br](http://www.cavernas.org.br)

# MAPEAMENTO E MODELAGEM 3D DO SETOR TURÍSTICO DA CAVERNA DO DIABO (SP) COM LASER SCANNER: RESULTADOS PRELIMINARES

*3D MAPPING AND MODELLING OF THE TOURISTIC SECTOR OF DEVIL'S CAVE (CAVERNA DO  
DIABO, SP): PRELIMINARY RESULTS*

**Carlos H. GROHMANN (1); Gabriel ZACHARIAS (2); Guilherme P.B. GARCIA (2); Francesco  
BARALE (2); Flavio Vaz de ALMEIDA (3); Ives Simões ARNONE (4)**

(1) Instituto de Energia e Ambiente, USP.

(2) Instituto de Geociências, USP.

(3) Escola Politécnica, USP.

(4) Parque Estadual Caverna do Diabo, Fundação para a Conservação e a Produção Florestal do Estado de São Paulo.

**Contatos:** [guano@usp.br](mailto:guano@usp.br); [gabriel.sugiura@usp.br](mailto:gabriel.sugiura@usp.br); [guilherme.pereira.garcia@usp.br](mailto:guilherme.pereira.garcia@usp.br);  
[francesco.barale@usp.br](mailto:francesco.barale@usp.br); [flaviovaz@usp.br](mailto:flaviovaz@usp.br); [bioives@gmail.com](mailto:bioives@gmail.com).

## Resumo

Neste trabalho apresenta-se um primeiro mapeamento 3D com Laser Scanner (*Terrestrial Laser Scanner - TLS*) do setor turístico da Caverna do Diabo. Foram realizadas 36 varreduras do TLS, unidas em uma nuvem de pontos com 1,15 bilhão de pontos. Para as análises, essa nuvem foi simplificada para 17,2 milhões de pontos. O volume calculado da caverna (74.500 m<sup>3</sup>) não mostrou variação significativa em nuvens com 1.000.000, 500.000, 250.000 e 50.000 pontos. Os dados gerados mostram diferenças importantes quando comparados com os mapas do PROCAD, o que reflete tanto as técnicas utilizadas na época como a subjetividade inerente ao levantamento topográfico espeleológico.

**Palavras-Chave:** topografia; espeleometria; passeio virtual; acessibilidade.

## Abstract

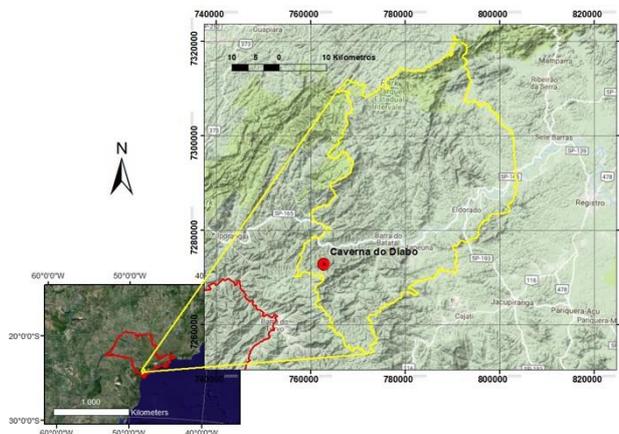
A first 3D survey with Terrestrial Laser Scanner (TLS) of the touristic sector of Devil's Cave (*Caverna do Diabo*) is presented. 36 TLS scans were fused into a 1.15 billion-points cloud. This cloud had to be simplified to 17.2 million points for analyses. Volume calculated from the 3D model (74,500m<sup>3</sup>) does not change much for clouds with 1,000,000, 500,000, 250,000 or 50,000 points. The data shows expressive differences from PROCAD maps, a reflex of the techniques used at the time as well as of the inherent subjectivity of the speleological topographic survey process.

**Keywords:** cave mapping; speleometrics; virtual tour; accessibility.

## 1. INTRODUÇÃO

A Caverna do Diabo, ou Gruta da Tapagem, é uma das cavernas mais conhecidas do Brasil e a única caverna de São Paulo com infraestrutura para turismo de larga escala, com iluminação elétrica fixa, escadarias e passarelas (Silvério, 2014).

Localiza-se no Parque Estadual da Caverna do Diabo (PECD), que integra o Mosaico de Unidades de Conservação do Jacupiranga, juntamente com outras 13 UCs, sendo gerenciada pela Fundação para a Conservação e a Produção Florestal, ou Fundação Florestal, ligada à Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo- SIMA/SP (Figura 1).



**Figura 1:** Localização da Caverna do Diabo.

Explorada desde o início do século XX, teve seu primeiro mapeamento realizado em 1964, liderado por Michel Le Bret (Valle, 2001) e na década de 1990 o Projeto Caverna do Diabo (PROCAD) da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE) culminou na produção de um mapa completo da caverna e diversos estudos relacionados. Entretanto, o último trabalho de mapeamento do PROCAD foi realizado em 1998 (Figueiredo et al., 2007).

Outros trabalhos que visavam o aprimoramento do mapeamento espeleológico da caverna foram feitos por Person (2013) e Silvério (2014) com uso de equipamentos mais precisos que os utilizados durante o PROCAD, como Estação Total. Estudos voltados à geologia, hidrogeologia e geomorfologia (Polistchuck 2011, Cordeiro 2013, Sallun Filho et al. 2015) vêm sendo desenvolvidos e contribuem para o conjunto do conhecimento sobre o sistema cárstico do local.

O objetivo principal deste trabalho foi a produção de um modelo tridimensional do setor turístico da Caverna do Diabo a partir de dados levantados por Laser Scanner Terrestre. O georreferenciamento do modelo 3D permite contribuições cartográficas e comparações com trabalhos anteriores.

## 2. METODOLOGIA

Equipamentos de Laser Scanner Terrestre (ou *Terrestrial Laser Scanner* - TLS) basicamente se utilizam de espelhos giratórios para realizar a deflexão de pulsos de laser que combinam dados de distância com dados de ângulos horizontais e verticais para produzir coordenadas 3D ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) (Buckley et al., 2008).

Neste trabalho foram utilizados dois modelos de TLS simultaneamente: FARO *focus* 3Dx130 e FARO *focus* S350. Cada varredura desses equipamentos gera uma nuvem de pontos com abrangência de 360° horizontal e 270° vertical (de maneira que apenas a área ocupada pelo tripé do equipamento não é coletada) com alcance efetivo de aproximadamente 50 à 60 metros, dependendo das condições da topografia local.

Os equipamentos TLS são instalados sobre tripés em cada ponto de varredura enquanto esferas brancas, são instaladas nas proximidades do durante o processo. O escaneamento destas esferas padronizadas serve para a posterior interligação entre as nuvens de pontos durante o pós-processamento. Desta forma, necessita-se que ao

menos três esferas fixas estejam inclusas em duas nuvens de pontos consecutivas. Foram realizadas 36 varreduras de TLS seguindo o circuito pelas passarelas de concreto, desde a entrada da caverna, até o Salão da Catedral.

Para o georreferenciamento da nuvem de pontos completa, foi necessário determinar as coordenadas das esferas dos trechos inicial e final da nuvem de pontos. As coordenadas foram obtidas por topografia clássica com Estação Total em uma poligonal levantada a partir de duas estações de GPS geodésico instaladas nas áreas do restaurante e do estacionamento do PECD.

O processamento de uma nuvem de pontos tão densa como a gerada a partir de um trabalho como este é um dos principais desafios a serem enfrentados (Gallay et al. 2015). Dentro desse conceito, incluem-se a junção de cada varredura em um projeto único, o georreferenciamento deste projeto a partir dos dados obtidos por DGPS e topografia e a produção de superfícies 3D que sejam condizentes com a realidade e possam ser usadas para modelagens matemáticas.

O processamento inicial dos dados foi realizado no software *FARO Scene 7.0*, onde se deu uma das etapas mais trabalhosas, que consiste em estabelecer uma relação geométrica entre os dados de cada varredura realizada (operação chamada de registro). Para essa tarefa, foi necessária a importação de cada varredura, seguindo a sequência de coleta de dados em campo, para que os dados pudessem ter sua relação geométrica mais facilmente estabelecida, devido a presença de ao menos três esferas em comum entre as varreduras. A partir do registro entre as varreduras, obteve-se a nuvem de pontos completa, com 1,15 bilhão de pontos.

Por se tratar de um ambiente extremamente úmido, as gotículas de água presentes no ar e o espelho d'água podem interferir na medição de alguns pontos pela reflexão do feixe de laser. Turistas em circulação na caverna durante as varreduras, e mesmo a própria equipe, são captados pelo TLS, e precisam ser removidos da nuvem de pontos para etapas posteriores de análise.

Após a etapa de limpeza manual da nuvem de pontos, foi necessário realizar uma subamostragem (ou decimação), pois o elevado número de pontos no espaço tridimensional dificulta o processamento mesmo em softwares dedicados, como *Meshlab* e *Cloud Compare*. A amostragem foi configurada para uma distância entre pontos de 5 cm, o que resultou em uma nuvem com 17,2 milhões de pontos.

Uma segunda nuvem de pontos foi gerada contendo apenas um grande espeleotema localizado no início do setor turístico. Os dados foram decimados com distância entre pontos de 5 mm, resultando em uma nuvem com 10,1 milhões de pontos.

As nuvens decimadas foram processadas no software *Meshlab* (Cignoni et al., 2008). Entre análises realizadas estão o cálculo de volume e massa do espeleotema e uma avaliação da variação do volume calculado da caverna a partir de nuvens de pontos ainda mais simplificadas.

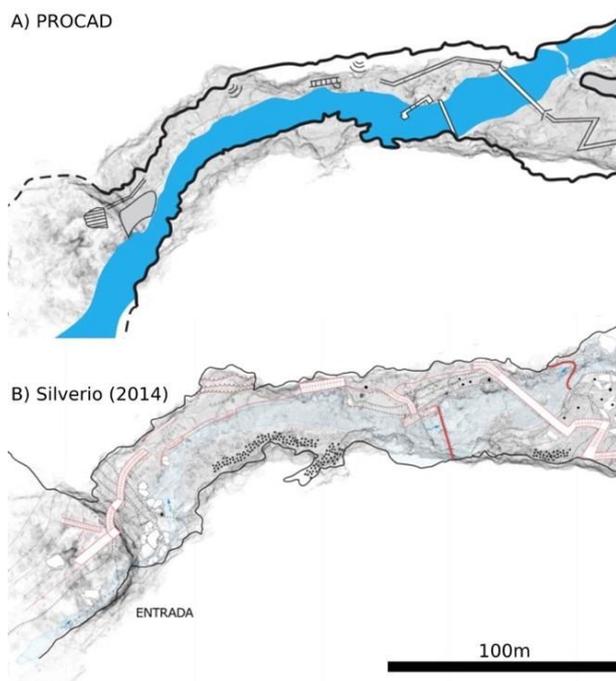
Para os cálculos do volume da caverna, a nuvem de pontos foi progressivamente simplificada com a ferramenta *Point Cloud Simplification*. Malhas (*meshs*) tridimensionais foram então geradas com a ferramenta *Poisson Surface Reconstruction*.

### 3. RESULTADOS

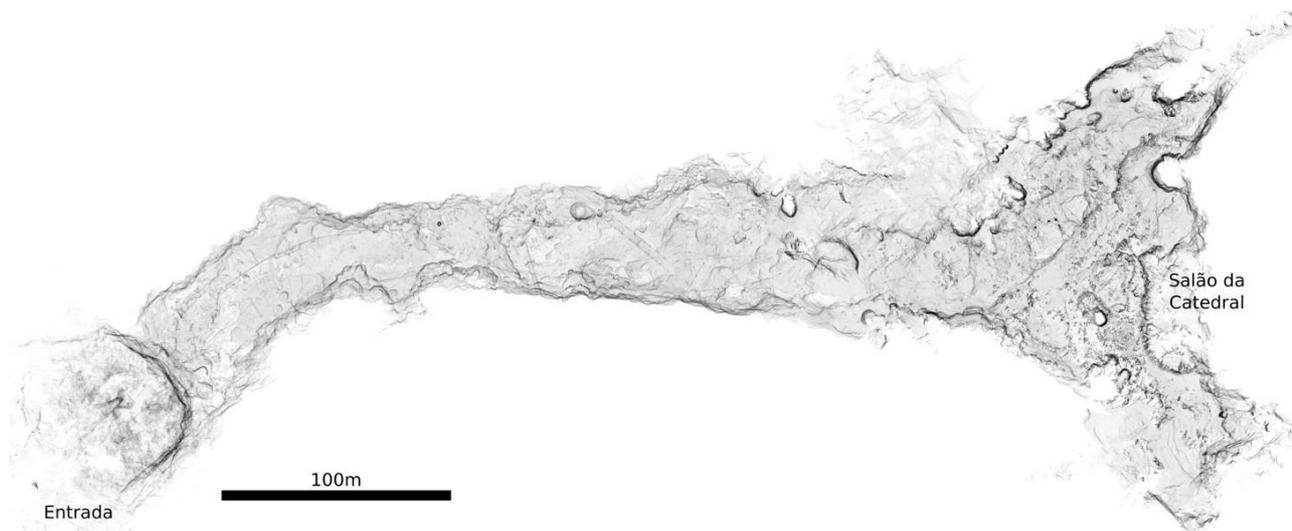
O principal resultado deste trabalho é a nuvem de 1,15 bilhões de pontos coletados por TLS ao longo do trecho turístico da Caverna do Diabo (Figura 2). A partir desse conjunto dados, diversas análises e produtos podem ser gerados, como comparação/atualização cartográfica, “passeios” virtuais, análises espeleométricas etc.

Uma comparação com os produtos cartográficos existentes para a caverna ilustra bem as limitações dos métodos tradicionais de mapeamento espeleológico, onde a geometria dos elementos mapeados depende não apenas dos equipamentos e métodos utilizados (bases fixas vs bases flutuantes, por exemplo), mas principalmente da experiência e subjetividade do “croquista”.

A Figura 2 mostra uma imagem em planta da nuvem de pontos produzida neste trabalho, e a Figura 3 traz uma comparação visual entre o mapa da Caverna do Diabo produzido pelo PROCAD, por Silvério (2014) e a nuvem de pontos produzida neste trabalho.



**Figura 2:** Comparação entre os dados produzidos com TLS e os mapas do PROCAD e Silvério (2014).



**Figura 3:** Vista em planta da nuvem de pontos produzida neste trabalho.

Enquanto que há diferenças marcantes com o mapa do PROCAD, os limites dos condutos definidos pelo TLS são muito similares aos do mapa de Silvério (2014), que utilizou dados levantados com DGPS e Estação Total por Person (2013).

O espeleotema selecionado para cálculo de volume e massa (Figura 4) tem dimensões de aproximadamente 9 x 3 m, com área superficial de 125 m<sup>2</sup>, volume de 50 m<sup>3</sup> e massa de 135.500 kg (considerando a densidade da calcita de 2,71 g/cm<sup>3</sup>).



**Figura 4:** Modelo 3D do espeleotema selecionado para cálculo de volume e massa.

O volume da caverna pode ser calculado a partir de uma malha “estanque” (*watertight*), fechada em todas as extremidades. O resultado do cálculo corresponde ao “volume de ar” dentro do modelo, sem considerar o volume dos espeleotemas ou passarelas, pontes etc.

Com o elevado número de pontos das nuvens, os arquivos se tornam grandes e o processamento mais demorado ou mesmo impraticável dependendo da configuração do computador utilizado.

A nuvem com 17,2 milhões de pontos foi progressivamente simplificada no *Meshlab* e o volume foi calculado em cada passo. A Tabela 1 traz os resultados da análise.

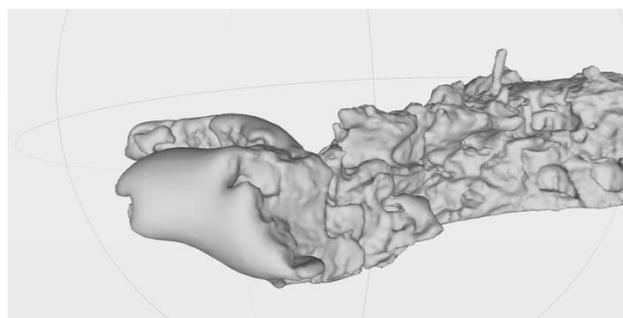
**Tabela 1:** Comparação entre os valores de volume calculados a partir de nuvens de pontos progressivamente simplificadas.

Número Pontos	Tam. Arquivo nuvem (.xyz)	Tam. Arquivo malha (.ply)	Volume (m <sup>3</sup> )	Área Sup. (m <sup>2</sup> )
17,2 x10 <sup>6</sup>	1.106,1 MB	799,3 MB	74.519	42.355
1,0 x10 <sup>6</sup>	71,2 MB	147,9 MB	75.145	40.792
500.000	27,3 MB	39,6 MB	73.318	35.295
250.000	13,8 MB	23,0 MB	73.438	32.500
50.000	3,1 MB	4,7 MB	74.055	27.295

Enquanto que o tamanho dos arquivos diminui drasticamente com o número de pontos, o volume calculado não sofre mudança significativa. Dessa forma, de acordo com o objetivo da pesquisa, pode-se trabalhar com arquivos menores e obter resultados significativos.

É preciso levar em consideração, entretanto, que a qualidade da reconstrução 3D (e de valores derivados) depende fortemente da distribuição dos pontos levantados pelo TLS. O ambiente cavernícola é, por sua natureza, um espaço composto de formas irregulares e com inúmeros anteparos (como blocos de rocha e espeleotemas) para o laser, o que irá resultar em áreas de “sombra”, sem dados no produto final.

Nessas áreas, a reconstrução da malha pelo método de Poisson irá produzir formas arredondadas que irão influenciar nos cálculos de volume. No caso de não ser possível completar os dados com novos levantamentos, tais artefatos podem ser suavizados manualmente em softwares de modelagem 3D. A Figura 5 traz um exemplo de superfície suave gerada na reconstrução 3D, na área da entrada da caverna.

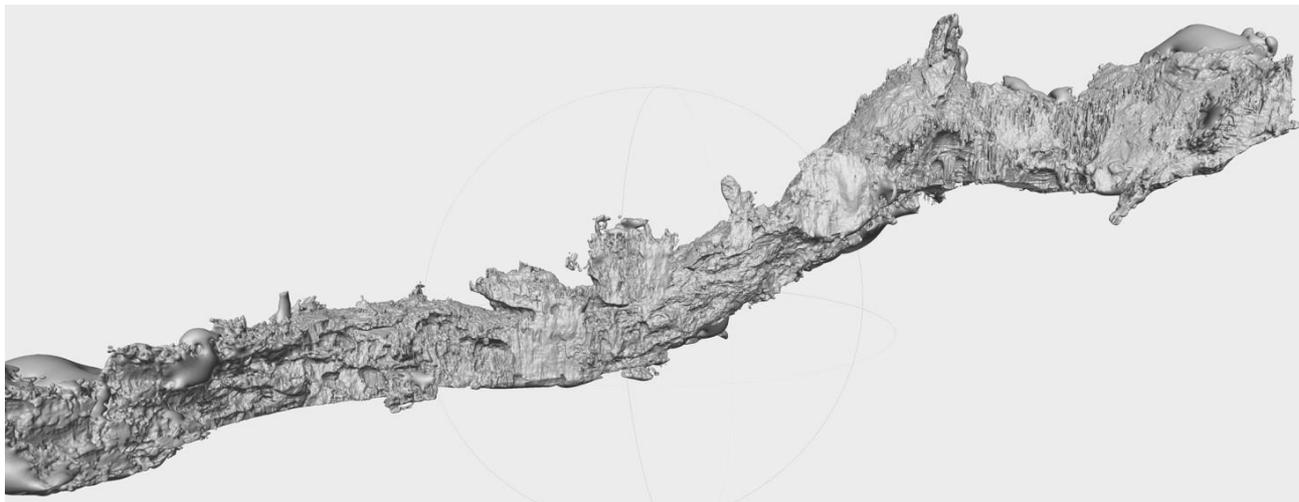


**Figura 5:** Superfície suave produzida em área sem dados na nuvem de pontos.

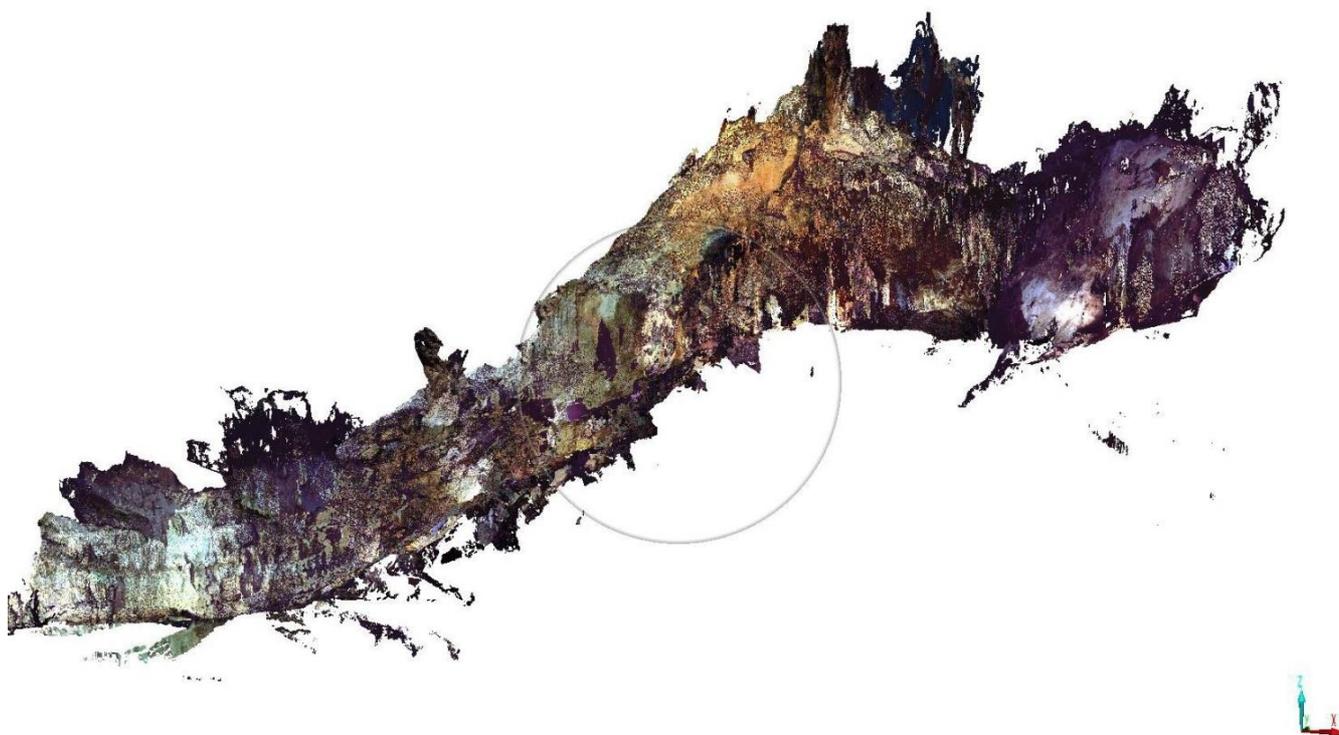
#### 4. CONCLUSÕES

O levantamento por TLS em cavernas brasileiras com fins científicos e turísticos ainda é incipiente. Enquanto que empresas de mineração realizem levantamentos para fins de licenciamento ambiental, os dados não são disponibilizados para o público.

Neste trabalho foi realizado um primeiro mapeamento 3D com Laser Scanner do setor turístico da Caverna do Diabo (Figuras 6 e 7), uma das mais importantes cavernas turísticas do Brasil.



**Figura 6:** Modelo 3D do setor turístico da Caverna do Diabo.



**Figura 7:** Nuvem de pontos do setor turístico da Caverna do Diabo.

Os dados foram levantados com propósito de documentação, pesquisa e acesso público sobre essa importante feição cárstica.

A continuidade da pesquisa prevê a realização de novos levantamentos, tanto para a complementação das áreas de sombra, quanto para a expansão do setor mapeado em 3D. Os dados deverão ser utilizados para gerar passeios virtuais e modelos físicos da caverna, ferramentas importantes e inovadoras em Educação e Conscientização Ambiental.

A cooperação científica na utilização dos dados e produção de material derivado é bem-vinda. Mais informações sobre o projeto, bem como

acesso à modelos 3D interativos (simplificados) e vídeos de divulgação podem ser encontrados no site do Laboratório de Análise e Modelagem Espacial do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (SPAMLab): <https://spamlab.github.io>.

## 5. AGRADECIMENTOS

Este projeto é desenvolvido com apoio FAPESP (proc. #2016/06628-0) em parceria com a FARO Brasil. C.H.Grohmann é bolsista de Produtividade CNPq (proc. #304413/2018-6).

## REFERÊNCIAS

- BUCKLEY S.J., HOWELL J.A., ENGE H.D., KURZ T.H. **Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations**. Journal of the Geological Society, v.165, 625- 638, 2008.
- CIGNONI, P., CALLIERI, M., CORSINI, M., DELLEPIANE, M., GANOVELLI, F., RANZUGLIA, G., **Meshlab: an open-source mesh processing tool**. Eurographics Italian chapter conference. 2008.
- CORDEIRO, B.M. **Planalto carbonático do André Lopes (SP): Geomorfologia cárstica e geoespeleologia da Gruta da Tapagem (Caverna do Diabo)**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- FIGUEIREDO, L.A.V., ZAMPAULO, R.A., GERIBELLO, F.K., PEDRO, E.G., DELL ANTONIO, R., LOBO, H.A.S. **Projeto Caverna do Diabo (PROCAD): aspectos históricos (1990-2007) e resultados das expedições da terceira fase**. Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Espeleologia, SBE, Ouro Preto. p.113-119, 2007.
- GALLAY M., KANUK J., HOCHMUTH Z., MENEELY J.D., HOFIERKA J., SEDLAK V., **Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave, Slovakia**. International Journal of Speleology, 44, 277-291, 2015.
- VALLE, M.A. Gruta da Tapagem (Caverna do Diabo). in AULER, A; RUBBIOLI, E.L.; BRANDI, R. **As Grandes Cavernas do Brasil**. Belo Horizonte: GBPE, p.136-137, 2001.
- PERSON, A.L. **Mapeamento espeleológico de detalhe do setor turístico da gruta da Tapagem (Caverna do Diabo) - SP**. Monografia de trabalho de formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- POLISTCHUCK, A., **Caracterização morfométrica da região cárstica da Serra André Lopes, Vale do Ribeira, SP**. Monografia de trabalho de formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- SALLUN FILHO W., CORDEIRO B.M., KARMANN I., **Structural and hydrological controls on the development of a river cave in marble (Tapagem Cave - SE Brazil)**. International Journal of Speleology, 44, 75-90, 2015.
- SILVÉRIO M.O., **Atuação da arquitetura no uso público de cavernas. Conceitos, métodos e estratégias para ocupação. Caverna do Diabo, SP. São Paulo**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.