

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Geociências

MODELAGEM 3D DO SETOR TURÍSTICO DA CAVERNA DO DIABO COM
USO DE LASER SCANNER

Gabriel Zacharias

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Grohmann de Carvalho

Monografia de Trabalho de Formatura
(TF-18/16)

São Paulo
2018

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Geociências

MODELAGEM 3D DO SETOR TURÍSTICO DA CAVERNA DO DIABO COM
USO
DE LASER SCANNER

De acordo,

Aluno: Gabriel Zacharias Sugiura

Prof. Dr. Carlos Henrique Grohmann de Carvalho

Monografia de Trabalho de Formatura
(TF-18/16)

São Paulo
2018

AGRADECIMENTOS

Ao Carlos Henrique Grohmann, pela orientação, apoio e ensinamentos.

Ao Guilherme Pereira Bento Garcia, pela disponibilidade e ajuda.

Ao Flávio Guilherme Vaz de Almeida Filho, pelo apoio e pela ajuda com o levantamento topográfico em campo.

Ao Francesco Barale, pelo apoio em campo.

Aos funcionários da FARO:

Adriano Scheuer, pelo excelente profissionalismo durante o trabalho de campo e pelos ensinamentos em relação ao manuseio dos equipamentos.

Clauson Lacerda, pela excelente dinâmica de ensinamento em relação ao pós-processamento dos dados.

SUMÁRIO

1.	IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO	3
2.	RESUMO	3
3.	ABSTRACT	4
4.	INTRODUÇÃO	5
5.	METAS E OBJETIVOS.....	9
6.	MATERIAIS E MÉTODOS	9
6.1.	ATIVIDADES REALIZADAS EM CAMPO.....	9
6.2	ATIVIDADES DE PÓS-PROCESSAMENTO	14
7.	RESULTADOS OBTIDOS.....	20
7.1	TOPOGRAFIA E GEORREFERENCIAMENTO	20
7.2	NUVEM DE PONTOS E <i>MESH</i>	20
8.	INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	22
9.	CONCLUSÕES.....	25
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da entrada da Caverna do Diabo e limites de município de Eldorado.....	6
Figura 2 - Mapa geológico local. Dados obtidos a partir do mapa geológico do estado de São Paulo (CPRM, 2006).	7
Figura 3 - Pontos estratégicos escolhidos para se obter coordenadas precisas com o DGPS. Da direita para a esquerda, trata-se dos pontos nomeados como fx1, fx2 e P07, cujos períodos de coleta de dados foram respectivamente de 5h37, 30 minutos e 2h14.	10
Figura 4 - TLS (<i>Terrestrial Laser Scanner</i>) montado sobre tripé na entrada da caverna com esferas fixadas dentro da área de detecção de pontos do aparelho.	11
Figura 5 - Levantamento topo gráfico realizado com Estação Total e prisma. Destacam-se as irradiações realizadas a partir do ponto P09 (1) e P12 (2).	13
Figura 6 - Estação Total (TopCon GPT-3200NW) e prisma utilizados no levantamento dos dados topográficos.	14
Figura 7 - Fluxograma da sequência de processos realizados em cada programa.....	15

Figura 8 - Imagens geradas a partir de diferentes ferramentas (linhas) disponíveis no software SCENE 7.0, a partir de duas visadas diferentes (colunas).....	17
Figura 9 - Comparação entre malhas geradas a partir de diferentes valores de <i>octree depth</i> utilizados na ferramenta <i>Poisson Surface Reconstruction</i>	19
Figura 10 - Nuvem de pontos da Caverna do Diabo.....	21
Figura 11 - <i>Mesh</i> (malha) produzida a partir da nuvem de pontos.....	22
Figura 12 - Domo do Salão da Catedral. <i>Mesh</i> feita a partir de nuvem de pontos de 1 milhão de pontos onde foi utilizado PSR com <i>octree depth</i> 8.	23
Figura 13 - Exemplo de alta resolução passível de ser obtida por geração de malha a partir de nuvem de pontos densa..	23
Figura 14 - Destaque para as feições estruturais perceptíveis ao ser realizada análise do modelo pelo se entorno.....	25

1. IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

Projeto / Nº: Modelamento 3D do setor turístico da caverna do diabo com uso de laser scanner/ TF-18/16

Aluno: Gabriel Zacharias Sugiura

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Grohmann de Carvalho

2. RESUMO

O escaneamento a laser terrestre (*Terrestrial Laser Scanner* - TLS) tem grande eficiência quando aplicado no mapeamento de cavernas. Além da contribuição para o avanço das técnicas utilizadas na produção de mapas de cavernas, destaca-se a possibilidade de produzir conteúdo tridimensional altamente detalhado.

Neste trabalho, foram utilizados equipamentos TLS no setor turístico da Caverna do Diabo (SP) com o intuito de se gerar um modelo tridimensional desse setor da cavidade.

São apresentadas as técnicas necessárias e os desafios enfrentados pela equipe durante o trabalho de campo e nas atividades de pós-processamento. A análise detalhada de espeleotemas específicos e de fraturas a partir das nuvens de pontos da caverna, por exemplo, constituem possibilidades que vão além da produção do modelo tridimensional da caverna em si.

Para que os dados pudessem ser georreferenciados, foi necessário determinar as coordenadas precisas de diferentes pontos conhecidos contidos na nuvem de pontos. Para este fim, equipamentos de DGPS foram instalados em pontos estratégicos, fora da caverna, e um levantamento topográfico com o uso de Estação Total foi responsável pela efetiva atribuição de coordenadas precisas à pontos no interior da caverna.

Com os dados da nuvem de pontos, foi feita uma reprodução do setor turístico da caverna em planta, que pode ser comparada com trabalhos anteriormente produzidos no mesmo local. Sendo assim, foi possível uma comparação qualitativa entre os mapas espeleológicos produzidos pelos métodos tradicionais e aqueles produzidos com TLS. Desta forma, destaca-se aqui a maior velocidade e precisão de mapeamento proporcionadas pelo escaneamento a laser. Além das proporções da caverna em si, foi possível a identificação de feições (fenda e fraturas) que já haviam sido descritas em trabalhos anteriores.

3. ABSTRACT

Terrestrial Laser Scanner (TLS) is an efficient technology which can be applied to cave mapping. In addition to contributing to the advancement of techniques used in the production of caves maps, the possibility of producing highly detailed three-dimensional content must be highlighted.

In this work, TLS equipment was used in the tourist sector of the Devil's Cave (SP) in order to generate a 3D model of this sector of the cavity

This paper presents the necessary techniques and challenges faced by the team during the field work and in the post-processing activities. The detailed analysis of specific speleothems and fractures from the point cloud data, for example, are some of the possibilities that go beyond the production of the three-dimensional model of the cave itself.

For georeferencing of the point cloud data, precise coordinates of different known points contained in the point cloud were necessary. To that end, a DGPS equipment was installed at strategic points outside the cave, and a topographic survey using Total Station was carried out for the determination of the coordinates of selected points inside the cave.

With the point cloud data, a plan view of the tourist sector of the cave was produced and it compared with previous maps of the same place. Thus, a qualitative comparison was possible between speleological maps produced by traditional methods and those produced with TLS. In this way, the higher speed and precision of the mapping work by laser scanning are highlighted here. In addition to the proportions of the cave itself, it was possible to identify features (crevice and fractures) that had been described in previous works.

4. INTRODUÇÃO

Desde o início do século XIX, a região do Vale do Ribeira é documentada por diversos observadores e suas características vêm sendo exaltadas. O naturalista Richard Krone e o geólogo John Casper Branner podem ser citados como os pioneiros que testemunharam as cavernas da região e contribuíram para o reconhecimento delas, que já naquela época, ressaltavam a importância turística da região, o que refletiu na criação de parques estaduais voltados para a preservação das áreas (Figueiredo, 2010).

A Caverna do Diabo está localizada à sudeste do Estado de São Paulo, no município de Eldorado (Figura 1), especificamente na Serra André Lopes, à margem direita do médio curso do Rio Ribeira de Iguape.

Também chamada por Gruta da Tapagem, é uma dentre as cerca de quatrocentas cavernas que situam-se no Vale do Ribeira (Figueiredo, 2010) e sua importância se dá por ser uma das maiores cavernas do país e a primeira do Estado de São Paulo a ter infraestrutura voltada para o turismo, o que foi feito no final da década de 1960 (Silvério, 2014). Localiza-se no Parque Estadual da Caverna do Diabo (PECD), que integra o Mosaico de Unidades de Conservação do Jacupiranga, e é gerenciada pelo Instituto Florestal.

Durante um longo período de tempo (de meados da década de 1970 até o final da década de 1980) a Caverna do Diabo deixou de ser alvo de expedições espeleológicas pois considerava-se a caverna menos interessante e voltada para o turismo. Sendo assim, a Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE) deu início ao Projeto Caverna do Diabo (PROCAD), uma vez que foi verificada a necessidade da produção de materiais em termo de estudo da região (Silvério, 2014). Este estudo culminou na produção de levantamentos espeleológicos interdisciplinares. 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 a Estação Total.

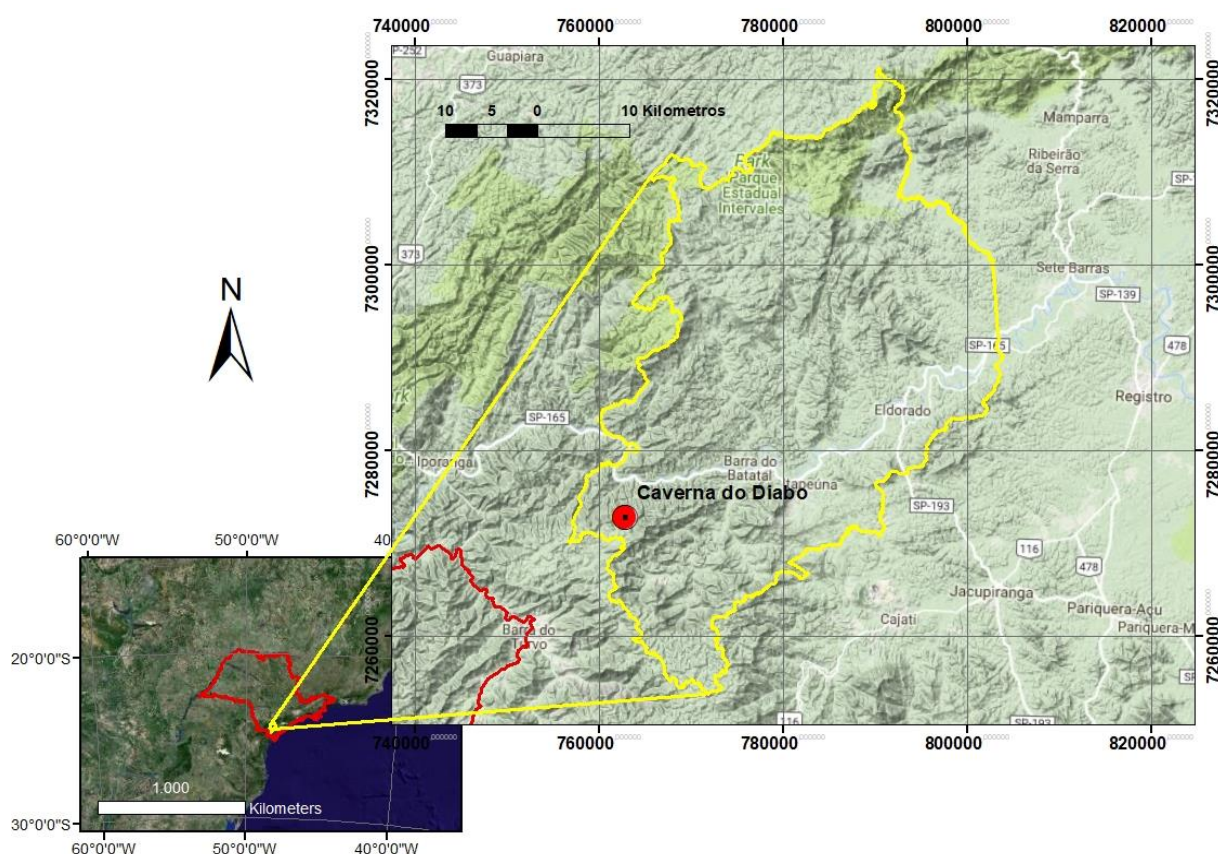


Figura 1 - Localização da entrada da Caverna do Diabo e limites do município de Eldorado.

Ainda referente a mesma caverna diversos dados (geomorfológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos, litológicos e estruturais) foram produzidos (Cordeiro, 2013; Sallun Filho et al., 2015). Dados estes que contribuem para a discussão em relação à gênese da caverna, além da contribuição em relação à produção cartográfica local.

Segundo o Comitê da Bacia Hidrográfica do Ribeira de Iguape e Litoral Sul (CBH-RB), a Caverna do Diabo está entre as 41 cavernas descobertas e descritas por Richard Krone, que realizou um dos primeiros trabalhos espeleológicos produzidos no local nos anos de 1896 e 1907, assim como Lourenço Granato, em 1901 (Brandi, 2007). O primeiro croqui elaborado após a travessia completa da caverna foi feito por Michel Le Bret, em 1964.

No que se refere aos trabalhos de cunho geológico é importante ressaltar o trabalho de mapeamento geológico realizado na região na década de 1970 pelo convênio DNPM/CPRM, que definem as rochas da região como pertencentes ao Grupo Açungui. Assim como o trabalho de Campanha *et al.* (1985), que subdividem o Grupo Açungui em Subgrupo Lajeado, Sequência Iporanga e Sequência Rio das Pedras. Sendo que o Subgrupo Lajeado foi dividido em sete formações (Gorutuba, Passa Vinte, Serra da Boa Vista, Mina de Furnas, Água Suja, Bairro da Serra e Betari). Segundo Campanha (1991), um grande número de intrusões granitóides, de idades e características diversas, afetam as rochas supracrustais e o embasamento gnáissico-migmatítico da região e este conjunto é

afetado por um denso sistema de cisalhamento. Tal contexto geológico proporciona a “lenticularização tectônica regional”, o que define blocos tectônicos em forma de sigmoides (Figura 2), desenvolvendo-se milonitos a depender da reologia dos protólitos.

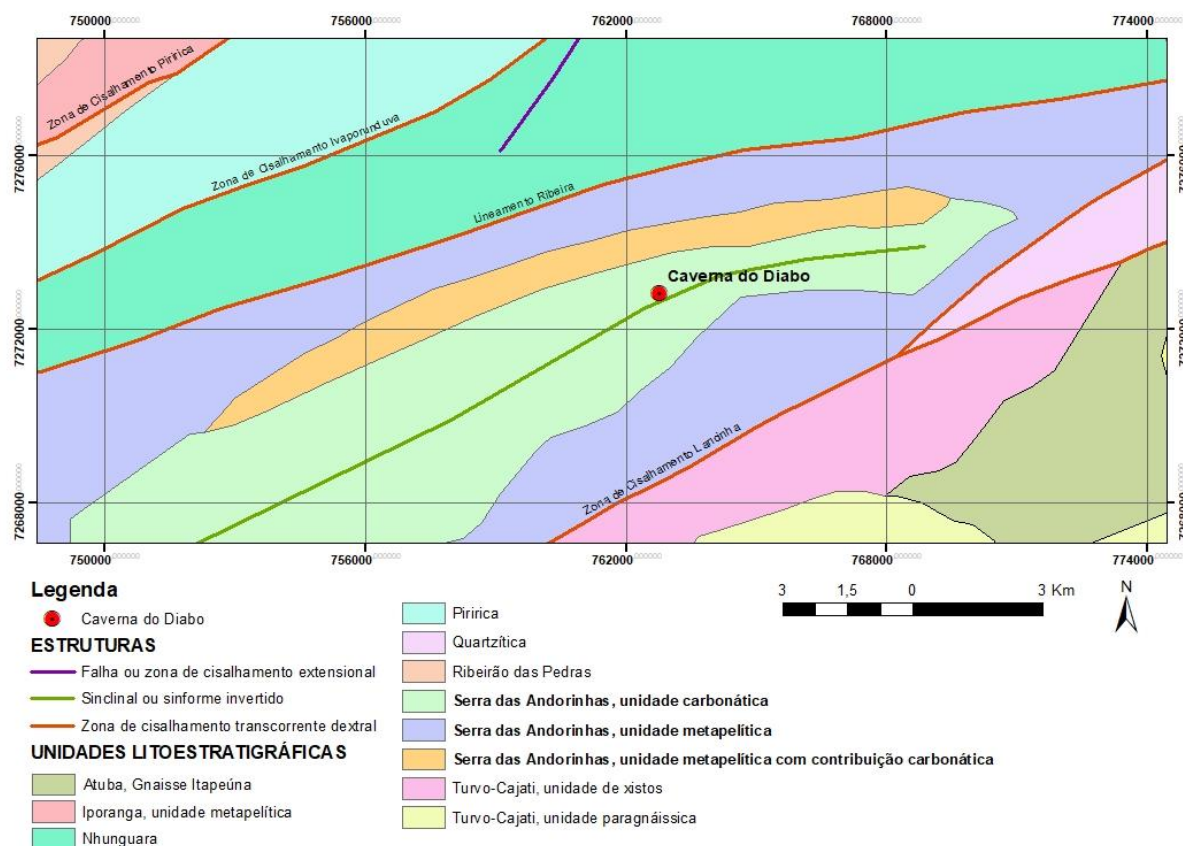


Figura 2 - Mapa geológico local. Dados obtidos a partir do mapa geológico do estado de São Paulo (CPRM, 2006).

A Caverna do Diabo localiza-se no Mármore da Tapagem que, juntamente com a Formação Perau e a Formação Setuva, formam o Bloco Andorinhas, que é limitado a norte pelo Lineamento Ribeira e a sul pelo Lineamento Lancinha-Itapeúna (Campanha, 2002). As rochas do Bloco Andorinhas são intensamente deformadas, dada a lenticularização e rompimento delas e de seus bandamentos, apresentando redobramento complexo em sua foliação principal. Ainda segundo Campanha (1991), referente ao Mármore da Tapagem, “trata-se de extenso corpo com forma elíptica em mapa, com dimensões maiores de 23 km x 4 km”. Este corpo sustenta o Planalto da Bandeira e possui feições cársticas muito bem desenvolvidas (drenagem superficial rala e errática, dolinas, cavernas, sumidouros, lagos e paredões verticais de mármore). De maneira geral, a rocha que forma o Mármore da Tapagem é fina, branca, isotrópica, homogênea e dolomítica (Campanha, 1991).

No Bloco Andorinhas, há um padrão de isógonas (linhas que unem pontos com rochas de mesma direção de foliação) que não está de acordo com o modelo de zonas de cisalhamento simples (Campanha, 2002)

A Caverna do Diabo está presente em um contexto diferente das rochas formadoras de carste na região uma vez que se trata de uma rocha de difícil dissolução (dolomítica). O Bloco das Andorinhas está em contexto de dobra sinclinal de flanco invertido (Figura 2), sua gênese é estruturalmente controlada e possui relação temporal ao evento de formação e desenvolvimento da Serra do Mar, de acordo com Sallun Filho et al. (2015). Em relação à dinâmica de recarga hidrológica, trata-se atualmente de um regime misto, em que as áreas de recarga são 61.72% autogênicas e 38.28% alogênicas.

A combinação única destes aspectos geomorfológicos e climáticos, em uma área relativamente restrita, torna o Alto Ribeira uma importante unidade de conservação, o que ressalta a necessidade de um planejamento detalhado e abrangente em relação ao uso humano da área, incluindo o turismo (Lobo et al., 2012). Neste sentido, o presente trabalho visa contribuir com a discussão acerca do uso de uma ferramenta relativamente recente para o levantamento de dados em cavernas.

A importância que os mapeamentos de cavidade possuem se dá principalmente em relação ao poder decisório que um mapa espeleológico possui. Pode-se dizer que os erros relacionados às etapas de topografia e cartografia podem interferir tanto na preservação da caverna quanto na viabilidade de empreendimentos. Isso ocorre pois uma caverna pode ser erroneamente classificada como sendo de menor relevância, o que pode acarretar na supressão de um patrimônio espeleológico importante. Por outro lado, o erro relacionado à supervalorização de uma caverna pode inviabilizar um projeto (Lott, 2005).

Os levantamentos de dados no local podem ser usados tanto em prol da melhoria do turismo na caverna quanto em prol da pesquisa científica. Neste estudo é proposto um levantamento de dados pelo uso de *Laser Scanner*, que consiste na aquisição e processamento de dados que formam uma nuvem de pontos com coordenadas X,Y,Z, o que permitirá também a produção de um modelo 3D de um trecho do setor turístico da caverna. Uma vez realizado o pós-processamento destes dados, espera-se conseguir detectar estruturas muitas vezes ocultas nas cavernas ou mesmo inacessíveis, e realizar cálculos geométricos precisos relacionados à área e volume da cavidade bem como de feições relevantes como espeleotemas.

5. METAS E OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é a produção de um modelo tridimensional do setor turístico da Caverna do Diabo que represente fielmente a realidade da caverna (proporções, áreas, volumes, feições). Além disso, buscou-se efetuar o georreferenciamento deste modelo tridimensional para possíveis contribuições cartográficas (Anexo 5) e comparações com trabalhos anteriores (Anexos 6 e 7).

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1. Atividades realizadas em campo

Trabalhos recentes realizados no Brasil (Araújo et al., 2015) destacam vantagens do uso do *Laser Scanner* em relação ao mapeamento de caverna como o aumento de precisão e quantidade de dados em relação aos trabalhos feitos pelo uso dos métodos tradicionais. Para que a aplicação do método fosse efetiva, foi necessário que não só o escaneamento com o TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) fosse realizado no interior da caverna como também um trabalho de topografia fosse feito em conjunto para posterior georreferenciamento.

Primeiramente, foram utilizados equipamentos de DGPS (*Differential Global Positioning System*) para que coordenadas precisas fossem obtidas em pontos no exterior da caverna, a partir dos quais se iniciou o levantamento topográfico que serviu basicamente para que as coordenadas de alta precisão pudessem ser transportadas até os pontos de interesse (pontos comuns entre o escaneamento e o levantamento topográfico).

As aquisições de dados pelo uso do DGPS dependem da quantidade de satélites em órbita aos quais os equipamentos ficam expostos, assim como do tempo pelo qual eles recebem sinal e da qualidade deste sinal. Sendo assim, não foi possível captar coordenadas de alta precisão nas localidades próximas à entrada da caverna, pois a vegetação local é densa, o que prejudica a captação do sinal. Por este motivo, foi necessária a realização do levantamento topográfico se iniciasse nos locais mais altos e com menos vegetação (estacionamento e restaurante do parque).

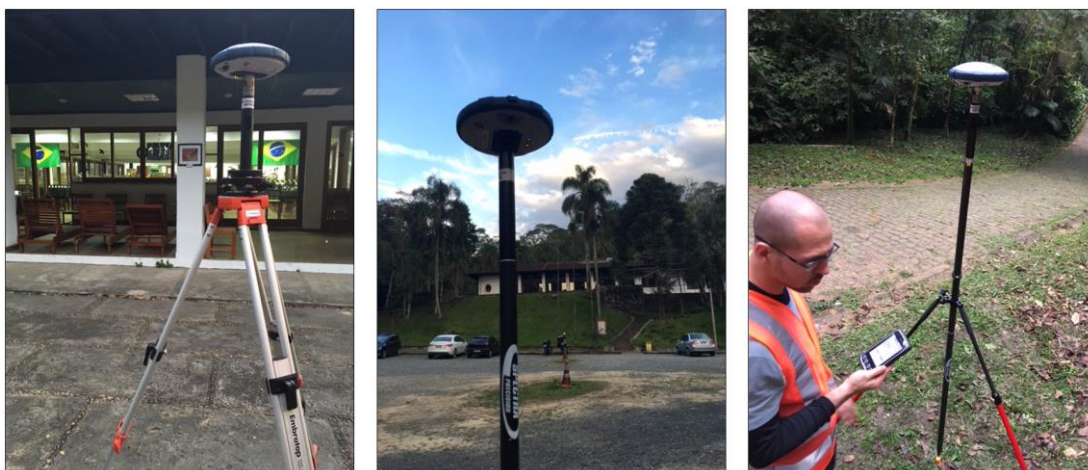


Figura 3 - Pontos estratégicos escolhidos para se obter coordenadas precisas com o DGPS. Da direita para a esquerda, trata-se dos pontos nomeados como fx1, fx2 e P07, cujos períodos de coleta de dados foram respectivamente de 5h37, 30 minutos e 2h14.

Dentre as dificuldades encontradas neste trabalho, destaca-se o levantamento topográfico realizado no interior da caverna, que apesar de desafiador, foi facilitado pela estrutura turística pré-existente no local, que facilitou o acesso e o transporte dos equipamentos, tanto da Estação Total e do prisma quanto dos TLS. Portanto, foi possível que as coordenadas de pontos comuns, tanto à topografia quanto ao escaneamento, fossem obtidas.

Os trabalhos cartográficos relacionados às cavernas e aos terrenos cársticos possuem diversas utilidades, entre elas destaca-se o entendimento genético das cavernas (Auler e Zogbi, 2005) e registro dos aspectos morfológicos da caverna, que podem contribuir com o entendimento hidrogeológico (Gallay et al., 2015).

O levantamento topográfico se deu mediante a proposta inicial que continha a pretensão de avaliar este método de mapeamento de caverna. Para isso, entendeu-se que o georreferenciamento do modelo tridimensional a ser gerado era necessário.

O trabalho de campo foi realizado entre os dias oito e dez de julho de 2018 e consistiu principalmente na produção de dados estratégicos de georreferenciamento e escaneamento da área de interesse com o TLS, para geração da nuvem de pontos. “Dados estratégicos” estes que foram pensados e começaram a ser produzidos na tarde do primeiro dia. Foram escolhidos e fixados no chão, com furadeira e parafuso, três pontos para a locação de base ou *rover* (GPS geodésico SP60, da *Spectra Precision*) em que foram obtidas coordenadas precisas com os equipamentos montados sobre tripés, sendo que nos outros dias também foram coletados dados nos mesmos pontos para posterior processamento, comparação e escolha em relação ao uso daqueles que houvesse menor erro.

O processamento dos dados obtidos pelo DGPS nos pontos acima citados (Figura 3) foi realizado pelo uso do software *Spectra Precision Survey Office*, onde o erro das

coordenadas foi reduzido pela realização de correções a partir dos dados das bases fixas da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) e parâmetros de órbita dos satélites. Os relatórios dos processamentos realizados encontram-se nos anexos 1, 2 e 3.

No segundo dia de campo, o enfoque foi dado na utilização dos equipamentos TLS. Foram usados dois modelos diferentes simultaneamente: FARO *focus* 3Dx130 e FARO *focus* S350. Estes equipamentos 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).

Os equipamentos TLS foram instalados sobre tripés em cada ponto de varredura enquanto esferas brancas, próprias do equipamento, foram instaladas nas proximidades do equipamento durante o processo (Figura 4). 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. Além disso, estas esferas foram utilizadas como pontos comuns entre a topografia e o escaneamento, de forma que foram obtidas as coordenadas de três esferas no exterior da caverna e três no interior, pelo uso da Estação Total.

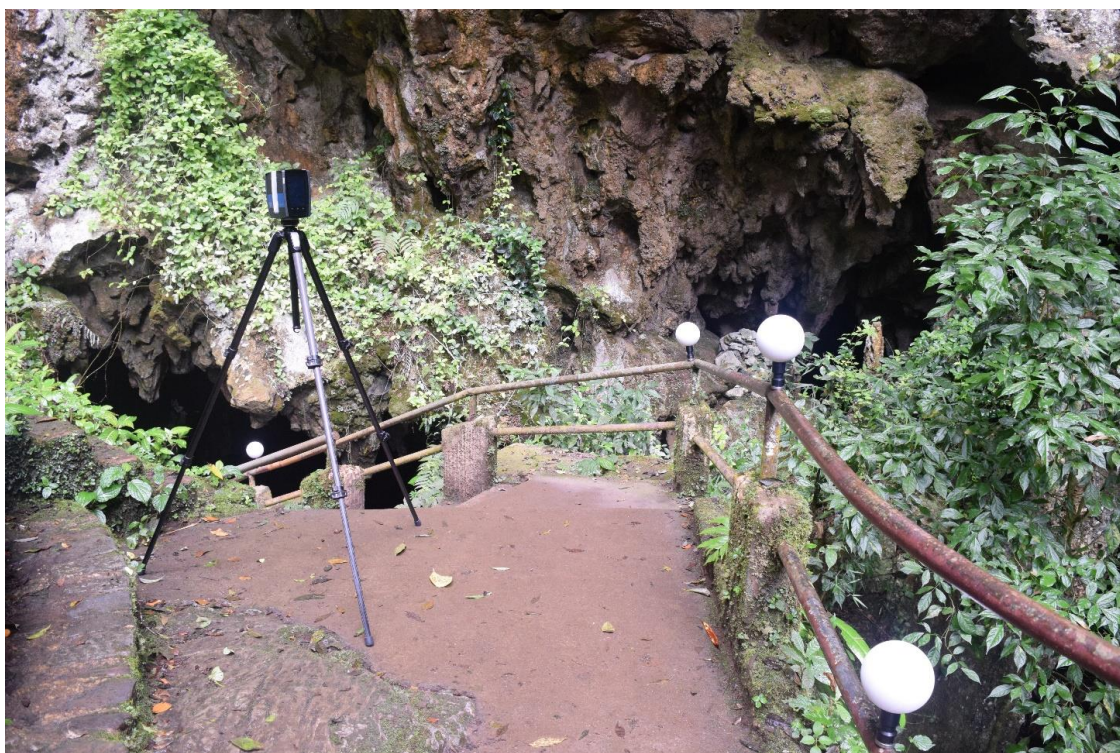


Figura 4 - TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) montado sobre tripé na entrada da caverna com esferas fixadas dentro da área de detecção de pontos do aparelho.

Tendo em vista que a precisão dos dados obtidos pelo DGPS é afetada pela exposição do equipamento aos satélites, foram definidos os pontos de aquisição de dados nos pontos fx1

e fx2, que se localizam nas imediações do estacionamento e do restaurante (clareiras), respectivamente. Em seguida, realizou-se um levantamento topográfico pelo método do caminhamento (Figura 5) com estação total e prisma.

O levantamento topográfico foi efetuado a partir do transporte de coordenadas, baseado na mediação do ângulo entre ré (ponto anterior) e vante (ponto seguinte) e pela medição das distâncias entre a Estação Total e os prismas, sendo que é o prisma que ocupa os pontos quando eles estão nas condições de ré ou vante (Cintra, 1997).

O método do caminhamento se iniciou no ponto fx1, com visada de ré em fx2 (ambos com coordenadas adquiridas pelo DGPS), a partir do qual seguiu-se, pela mesma trilha que liga o estacionamento à entrada da caverna, passando pelo ponto P07 (cujas coordenadas também foram definidas por DGPS, ainda no exterior da caverna), até o ponto P15, que se locou próximo aos últimos pontos de escaneamento, no interior da caverna. Tal levantamento foi feito com a intenção de se realizar o georreferenciamento da nuvem de pontos a partir de visadas efetuadas com a Estação Total que mediram algumas das mesmas esferas fixas utilizadas no processo de escaneamento, processo semelhante ao desenvolvido no trabalho de Gallay et al. (2015). Foram dos pontos P09 (fora da caverna/início da nuvem de pontos) e P15 (interior da caverna/final da nuvem de pontos) que estas medidas de visadas de esferas devidamente identificadas foram feitas. O método utilizado para a realização destas medidas foi o de irradiação, isto é, a partir dos pontos que estavam na sequência do método do caminhamento (P09 e P15), medidas de vante foram feitas da Estação Total ao centro das esferas de maneira independente.

Sendo assim, foram obtidas as coordenadas dos pontos das esferas medidas (B1, B2, B3, B4, B5, B6 e B7) e de pontos fixos auxiliares (R1, R2 e R3) a fim de georreferenciar a nuvem de pontos a partir destas coordenadas (Anexo 4).

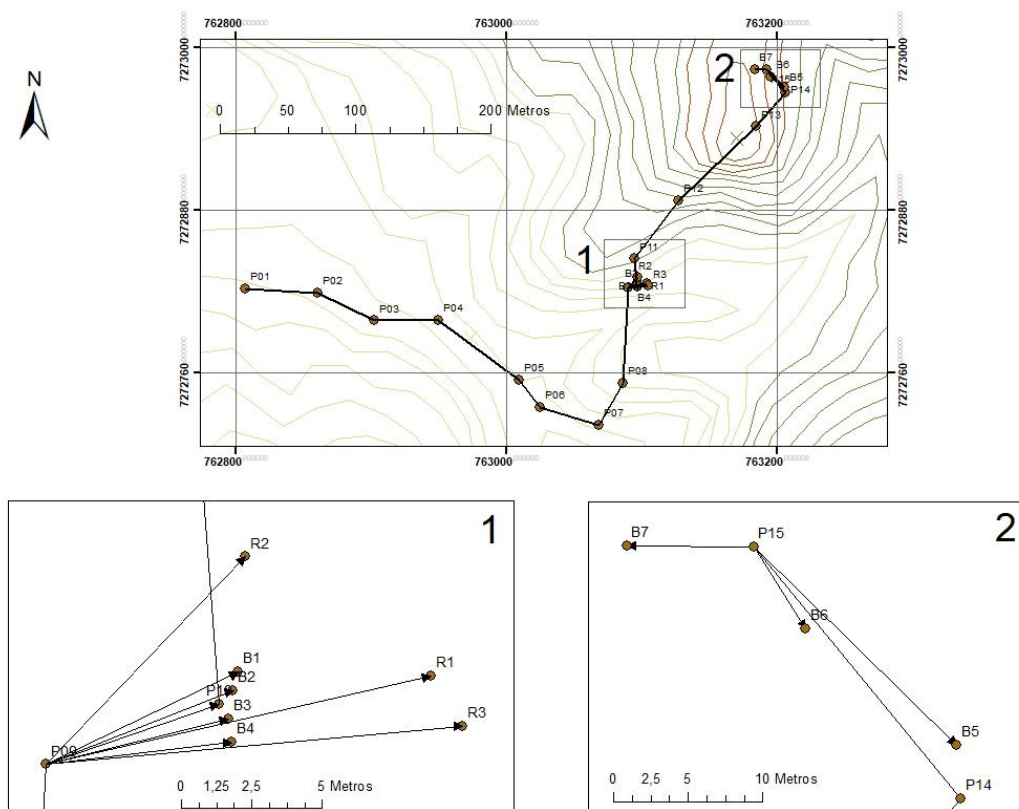


Figura 5 - Levantamento topo gráfico realizado com Estação Total e prisma. Destacam-se as irradiações realizadas a partir do ponto P09 (1) e P12 (2).

No terceiro dia de campo, a base do DGPS foi locada no P07 e dados de satélite foram coletados durante um tempo maior (2h14) em relação ao tempo do primeiro dia de campo (30min), desta forma, as coordenadas obtidas por esta medida obtiveram precisões horizontal e vertical mais significativas, que variaram de 0,17m e 0,33m (primeiro dia) para 0,024m e 0,096m (segundo dia). Além disso, durante esta coleta de dados, realizaram-se as medidas de topografia no decorrer da trilha que liga o estacionamento à caverna.

Os pontos em que se coletou medidas com o DGPS foram posicionadas em locais confiáveis e permanentes (marcados com furadeira e parafuso), que poderão ser localizados futuramente. Os métodos de Euler e Zogbi (2005) foram adaptados pois as medições foram realizadas pelo uso da Estação Total e prisma (Figura 6) ao invés de bússola e clinômetro, o que confere menor erro aos dados obtidos.



Figura 6 - Estação Total (TopCon GPT-3200NW) e prisma utilizados no levantamento dos dados topográficos.

6.2 Atividades de pós-processamento

Como descrito por Gallay et al. (2015), o pós-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. Dentro do conceito de pós-processamento, incluem-se a junção de cada escaneamento feito (cada ponto em que se montou o equipamento) em um projeto único, o efetivo 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.

Devido a utilização de softwares específicos para realização de diferentes processos com os dados obtidos em campo, foi elaborado um fluxograma da sequência de processos realizados (Figura 7).

Os dados em questão (nuvens de pontos) foram enviados pela empresa FARO Technologies no formato “.fls” com o conteúdo de localização dos pontos (dados x, y, z), assim como o conteúdo fotográfico registrado pelos equipamentos (a serem posteriormente utilizadas para atribuir dados RGB aos pontos).

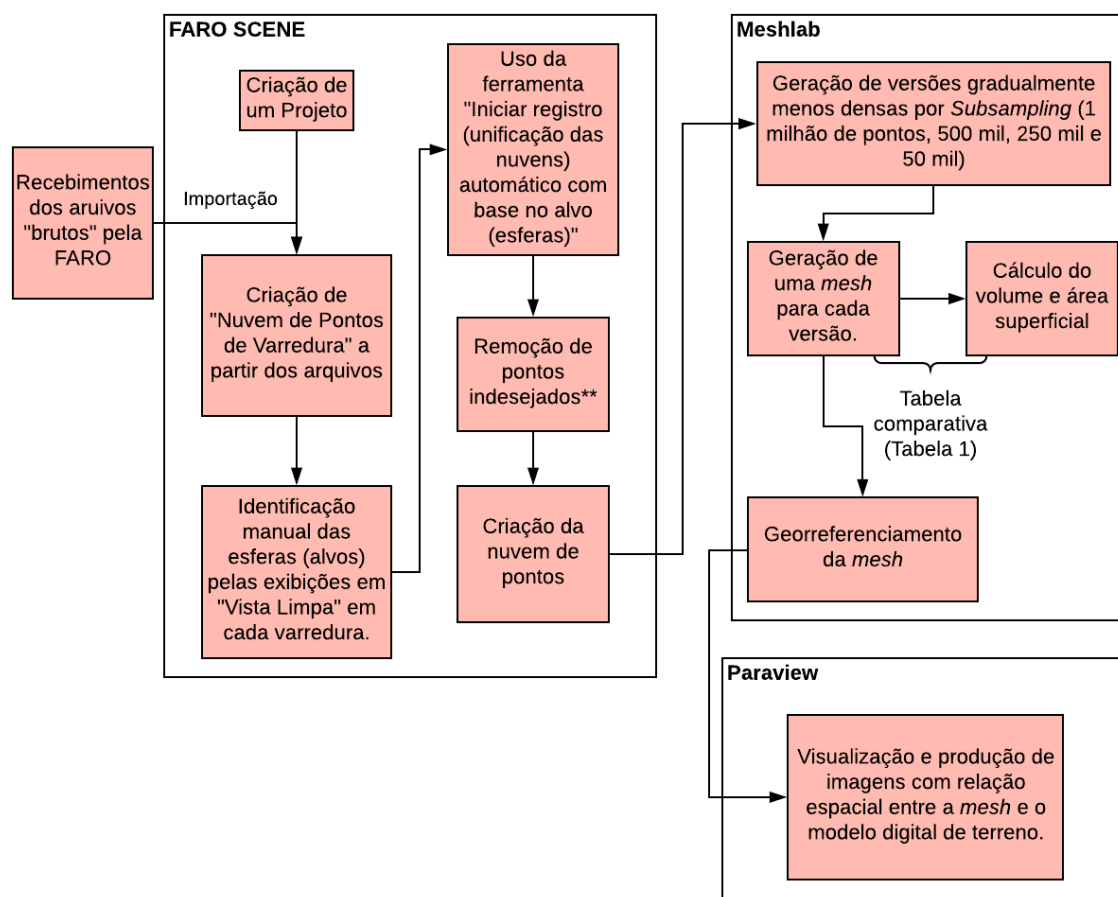


Figura 7 - Fluxograma da sequência de processos realizados em cada programa.

O ambiente e a situação em questão geraram alguns erros que são comuns aos trabalhos que utilizam TLS em cavernas. Tratando-se de um ambiente extremamente úmido, as gotículas de água presentes no ar e as lâminas d'água podem interferir na medição de alguns pontos pela reflexão do feixe de laser. Além disso, a circulação de turistas na caverna, além da própria equipe, também foram responsáveis por erros de medição. Portanto foi necessária uma correção manual da nuvem para a remoção destes erros de medida. Este procedimento consistiu em navegar virtualmente pela nuvem de pontos e utilizar das ferramentas de seleção para apagar os pontos que constituíam os erros.

No início do pós-processamento foi utilizado o *software* SCENE 7.0, desenvolvido pela FARO Technologies, onde se deu uma das etapas mais trabalhosas, na qual se estabeleceu uma relação geométrica entre os dados de cada varredura realizada. Para que tal tarefa fosse realizada com êxito, foi necessária a importação de cada varredura, seguindo a sequência de coleta de dados em campo, para que as varreduras que foram obtidas próximas umas das outras pudessem ter uma relação geométrica estabelecida, já que havia ao menos três esferas em comum escaneadas por sucessivas varreduras. Assim, pela correta relação geométrica entre cada varredura, obteve-se a nuvem de pontos completa.

Existe a possibilidade de identificação automática das esferas e posterior alinhamento das nuvens, mas no caso de cavernas ou outros ambientes complexos, feições arredondadas (espeleotemas) são identificados erroneamente como esferas próprias do equipamento, o que prejudica o correto alinhamento entre os dados. Sendo assim, as esferas que de fato foram utilizadas para este fim, de estabelecer uma ligação geométrica entre as nuvens de pontos, tiveram que ser selecionadas manualmente com o uso do *software*.

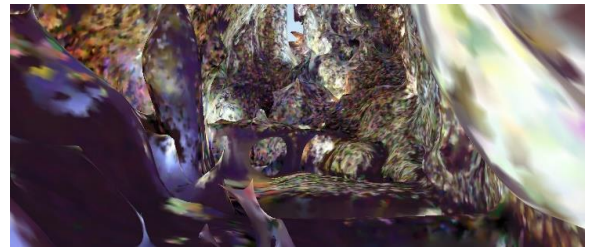
Esta relação geométrica que possibilitou a geração de um único projeto, coeso e com todos os dados coletados durante a campanha se deu pela marcação manual das esferas

Além disso, o *software* oferece outras ferramentas que permitem diferentes experiências visuais na navegação pela nuvem de pontos ou pela *mesh* (superfície contínua). Não serão aprofundados os conceitos matemáticos por trás das diferentes ferramentas que permitem estas visualizações nomeadas como “Modelo de arame”, “Filtrada”, “Vista limpa”, ou até mesmo os cálculos utilizados para a produção do *mesh* inicial (Figura 8).

Entrada da caverna

Interior da caverna

Mesh



Modelo em arame



Nuvem de pontos filtrada



“Vista limpa”

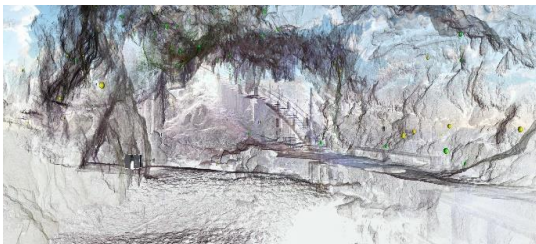


Figura 8 - Imagens geradas a partir de diferentes ferramentas (linhas) disponíveis no software SCENE 7.0, a partir de duas visadas diferentes (colunas).

Neste primeiro *software* ainda foi possível a obtenção do “Mapa de Visão Geral”, que consiste em uma planta detalhada do trecho em que o TLS foi utilizado, obtido a partir das nuvens de pontos. A partir deste mapa, pôde-se estabelecer uma relação entre o presente trabalho e os mapas anteriormente produzidos por Silvério (2014) e pelo Projeto Caverna do Diabo (PROCAD), da SBE (Sociedade Brasileira de Espeleologia) (Anexos 5, 6 e 7).

Ressalta-se que o mapa em questão, produzido a partir das medições feitas pelo TSL, possui erros de medição milimétricos. Dessa forma, é conferida maior confiabilidade às dimensões deste trabalho do que as que foram produzidas a partir das medições dos trabalhos anteriores, cujos principais instrumentos utilizados foram bússola e clinômetro.

As diferenças entre as dimensões obtidas nos mapas produzidos neste trabalho e em Silvério (2014) (Anexo 6) são mínimas. Este fato se dá pois o método de georreferenciamento utilizado em ambos foi o mesmo. Coletaram-se dados topográficos da

caverna pelo uso de DGPS e Estação Total neste trabalho (descritos anteriormente) e Silvério (2014), que utilizou os dados cedidos por Person (2013).

Em relação às representações computacionais de superfícies, que constituem um assunto amplamente estudado, observa-se que a constituição destas superfícies é basicamente feita por vértices, arestas e faces criados a partir da nuvem de pontos (Silvestre et al., 2013).

O processo de subamostragem realizado com o *software* SCENE 7.0 foi necessário para que a nuvem de pontos pudesse ser manuseada no *software Meshlab* devido a alta capacidade de processamento exigida. Ele se deu pela limitação de distância de medição (30 m), isto é, pontos que foram medidos a distâncias maiores do que 30 m em relação ao equipamento foram excluídos da nuvem de pontos. Além disso, a ferramenta realiza uma homogeneização da densidade de pontos.

Possibilitada a importação e manuseio da nuvem de pontos no programa *Meshlab*, outras subamostragens foram realizadas neste programa a fim de que uma comparação (Tabela 1) fosse feita entre a qualidade das malhas produzidas por cada nuvem. O processo se deu pela ferramenta *Point Cloud Simplification*, que consiste no estabelecimento de uma determinada quantidade de pontos representativos aos quais a nuvem será reduzida/simplificada. No que se decorreu com o uso do programa *Meshlab*, além do processo de subamostragem para a comparação dos resultados (Tabela 1), a principal ferramenta utilizada foi a *Poisson Surface Reconstruction* (Kazhdan e Hoppe, 2013) que gerou os produtos de melhor qualidade gráfica e representatividade da realidade entre as ferramentas de geração de superfícies a partir de pontos.

A ferramenta em questão gera uma superfície contínua em 3D a partir dos pontos orientados. Trata-se de uma função escalar cujos gradientes melhor combinam com o campo de vetores (pontos orientados) (Silvestre et al., 2013).

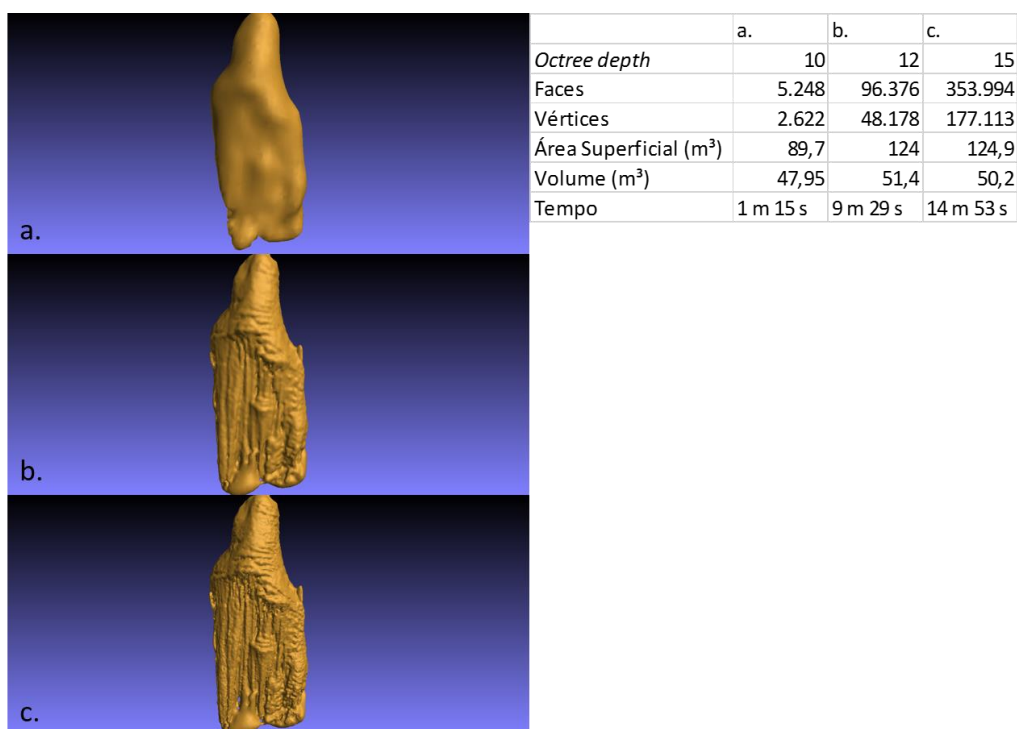


Figura 9 – Comparação entre malhas geradas a partir de diferentes valores de *octree depth* utilizados na ferramenta *Poisson Surface Reconstruction*.

Não serão detalhados, neste trabalho, os processos matemáticos por trás das funções utilizadas, porém, vale destacar que a principal variável passível de mudança na aplicação da ferramenta é a *octree depth*, que indica o nível de importância que será atribuído a cada ponto. Quanto maior este parâmetro, melhor é a definição da malha gerada mas o tempo de processamento entre a nuvem e a malha varia exponencialmente com o valor da *octree depth*.

Para fins de comparação, foram feitas malhas com diferentes valores de *octree depth* de um espeleotema em específico, assim como comparados os dados geométricos provindos de cada uma delas (Figura 9).

Destaca-se que um maior nível de detalhe é conferido à imagem 9C (*octree depth* 15), entretanto, o tempo de processamento requerido para a obtenção do mesmo nível de detalhe na nuvem de pontos completa é inviável.

Sendo assim, a malha passível de ser gerada dentro das capacidades computacionais disponíveis para o projeto foi a com o valor de *octree depth* 12. Tal valor foi obtido pois percebeu-se que era possível gerar uma malha da caverna toda em um tempo razoável (cerca de 3 horas) e o nível de detalhe apresentado foi suficiente para os fins deste trabalho.

7. RESULTADOS OBTIDOS

7.1 Topografia e georreferenciamento

Como descrito anteriormente, utilizou-se do DGPS (ou GPS geodésico) para a obtenção das coordenadas precisas dos pontos (fx1, fx2 e P07). Foram encontradas dificuldades em relação a esta tarefa pois trata-se de um vale com densa vegetação, o que dificulta muito a obtenção de sinal de satélites, essenciais ao funcionamento do equipamento e obtenção precisa das coordenadas. Além dos relatórios de processamento das coordenadas destes pontos descritos constarem nos anexos (1, 2 e 3) deste trabalho, foram feitas marcações permanentes com furadeira e parafusos nos locais onde se posicionaram os equipamentos de DGPS (base ou *rover*).

Foi diante desta dificuldade que o alinhamento das etapas (obtenção de dados pelo DGPS, medições topográficas e escaneamento 3D) foi planejado e executado.

No que se refere ao levantamento topográfico, a dificuldade foi atenuada pois há estrutura de acessibilidade no exterior e no interior da caverna para o turismo no local, o que facilita no uso e no transporte dos equipamentos. Entretanto, por tratar-se de um ambiente complexo e linear, não foi possível a geração uma poligonal fechada, em que o erro pode ser calculado, mas sim na geração de uma poligonal aberta, o que impede que seja feita a verificação do erro atribuído às medidas realizadas com a Estação Total e prismas.

7.2 Nuvem de pontos e *mesh*

O principal resultado deste trabalho foram os 1,15 bilhões de pontos coletados pelos TLS ao longo do trecho turístico da Caverna do Diabo, que constituem os dados “crus”, resultante imediato do trabalho realizado em campo. A partir destes dados, foram obtidos os dois principais produtos deste trabalho: a nuvem de pontos e o *mesh* (malha) georreferenciados (Figuras 10 e 11).

A complexidade do ambiente em questão dada pela alta densidade de pequenas reentrâncias e irregularidades formadas pelos espeleotemas constituíram em um fator que dificultou a etapa de processamento dos dados. Com a geração de um grande número de pontos cegos na nuvem de pontos, algumas áreas ficaram constantemente fora de alcance dos *lasers*, onde não foram obtidos dados espaciais (x, y, z).

Devido à geração destas áreas sem pontos, as primeiras malhas geradas pelo *software meshlab*, por ferramentas como o *Ball – Pivoting Algorithm* (BPA) (Bernardini, 1999), resultaram em superfícies com buracos, problema semelhante ao relatado em Silvestre et al. (2014). Tal dificuldade foi solucionada pelo uso da ferramenta *Poisson Surface Reconstruction* (PSR) (Kazhdan e Hoppe, 2013).

Os processos matemáticos intrínsecos a cada ferramenta não serão abordados em detalhes. Entretanto, vale ressaltar que esta diferença entre eles é dada pois o BPA forma uma malha triangular simples a partir dos dados espaciais (x, y, z) dos pontos, e o PSR requer que os pontos estejam normalizados para que seja determinada uma superfície orientada como um campo vetorial contínuo. (Silvestre et al., 2014).

Apesar da equipe ter contado com um profissional experiente em relação ao manuseio dos equipamentos (TLS), o escaneamento a partir de pontos fixos em um ambiente de geometria complexa (caverna) promove áreas que permanecem fora do alcance dos escaneamentos realizados. Entretanto, mediante à grande quantidade de pontos e aos recursos de pós-processamento, como a geração de malhas a partir das nuvens de pontos, acredita-se que tal problema foi resolvido.

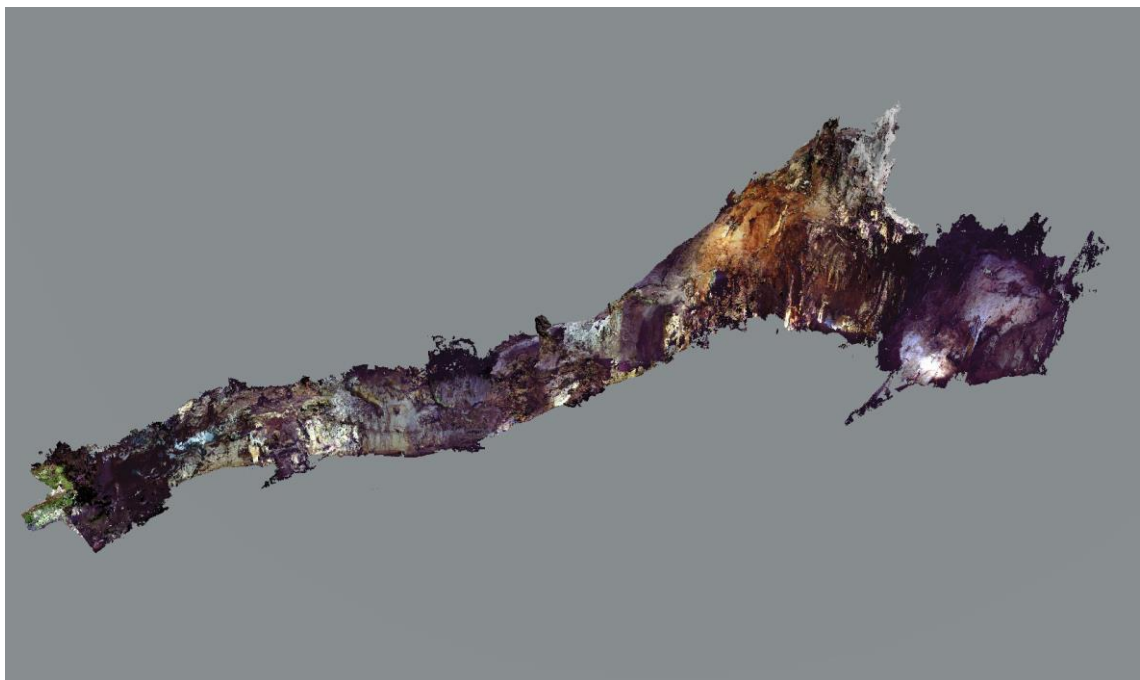


Figura 10 - Nuvem de pontos da Caverna do Diabo (FARO SCENE 7.0).

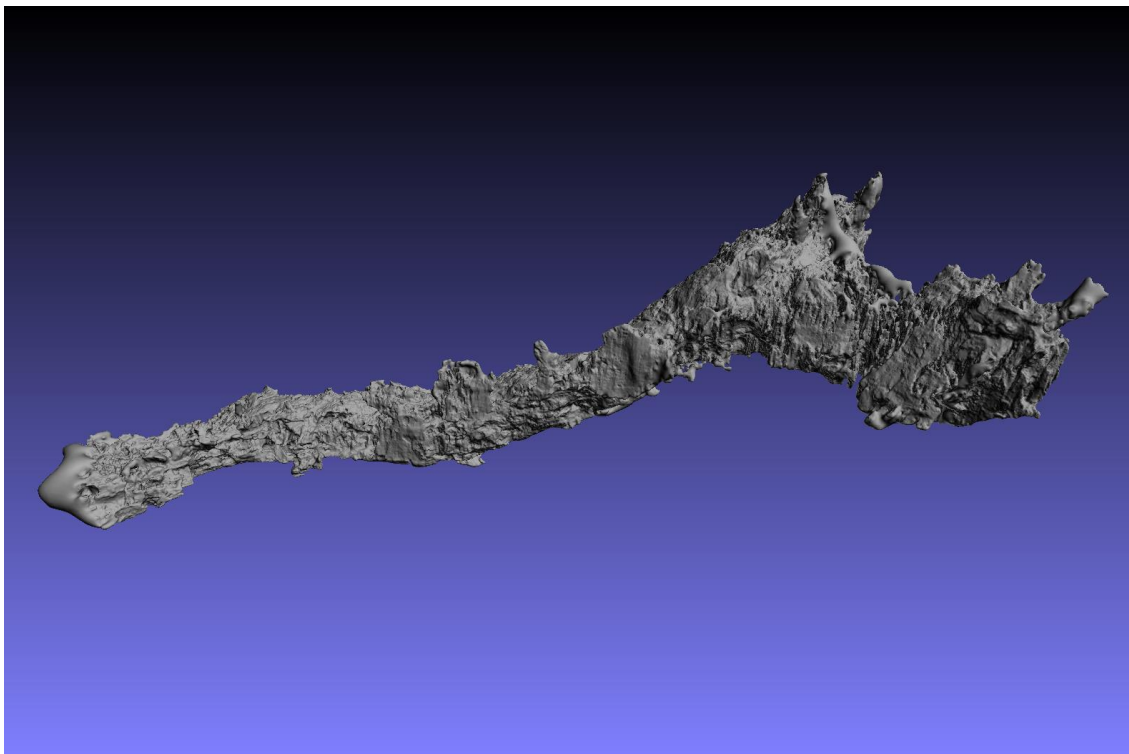


Figura 11 - *Mesh* (malha) produzida a partir da nuvem de pontos (*Meshlab*).

8. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Entende-se que a principal tarefa deste trabalho se deu pela efetiva elaboração dos dois principais produtos aqui apresentados: a nuvem de pontos e a *mesh*.

A partir do *mesh* gerado, é possível a obtenção de parâmetros como o volume interno da caverna (trecho mapeado), cujos valores variam de acordo com as ferramentas utilizadas na geração da *mesh* e as variáveis intrínsecas às ferramentas. Desta forma, foram estudadas diferentes maneiras de se produzir malhas representativas e os valores de volume foram comparados. Utilizou-se da ferramenta *Poisson Surface Reconstruction*, do programa *Meshlab*, para que diferentes malhas fossem produzidas. A diferença entre as malhas se deu por mudanças na variável *octree depth*. A partir dos resultados obtidos (Figura 9), destaca-se que o valor dos volumes sofreu pouca alteração entre as malhas geradas apesar das diferenças nítidas de detalhe entre elas, que é maior quanto maior for o valor do *octree depth* utilizado.

No mapeamento de cavernas convencional, as determinações de volumes de espeleotemas ou feições de interesse são trabalhosas e, mesmo com muitas medições realizadas, são muito menos precisas do que as que podem ser feitas a partir da nuvem de pontos. Além da medição do volume de um dos principais espeleotemas da caverna (Figura 9), o domo presente no Salão da Catedral, abaixo de onde foi inferido a fenda (Anexo 7),

também teve seu volume calculado (Figura 12). O valor do volume obtido foi de 1982 m³, o da altura foi de 7,87 m e o do raio da base do domo foi de 12,35 m.

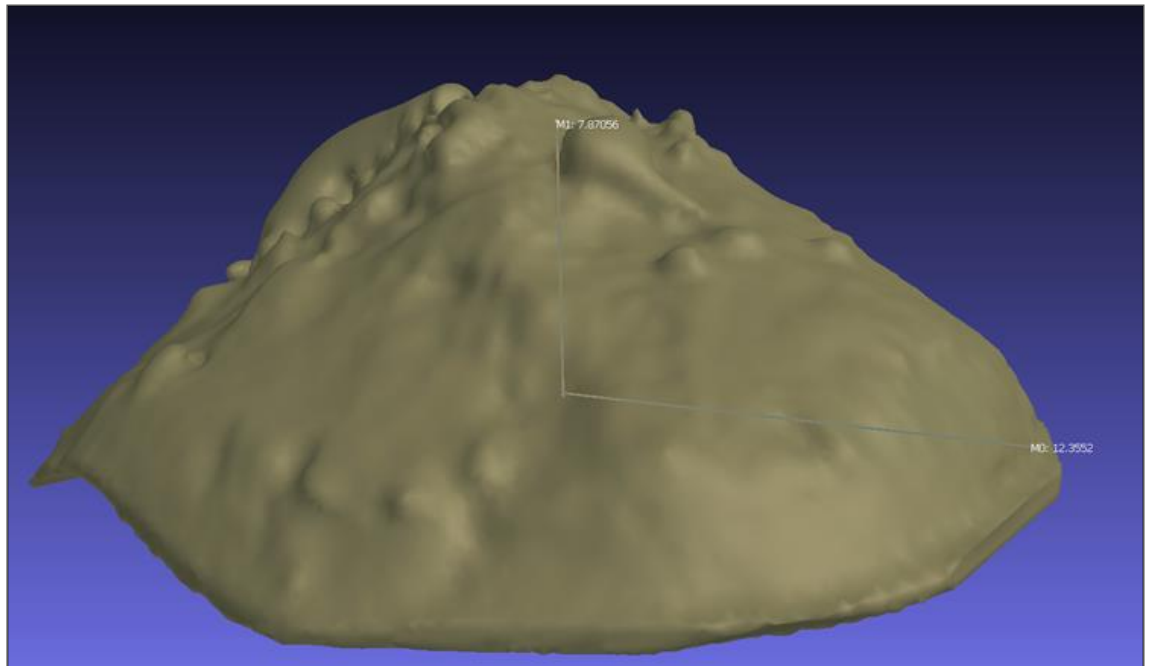


Figura 12 - Domo do Salão da Catedral. *Mesh* feita a partir de nuvem de pontos de 1 milhão de pontos onde foi utilizado PSR com *octree depth 8*.

Em relação à nuvem de pontos, destaca-se que é possível que se selecione porções de interesse pelo *software* SCENE 7.0, o que possibilita a exportação do conjunto de pontos que estão no interior deste volume em questão, sem que a nuvem de pontos seja decimada (simplificada). Assim, limitando-se uma área de interesse, é possível que uma malha de alta resolução seja gerada (Figura 13).

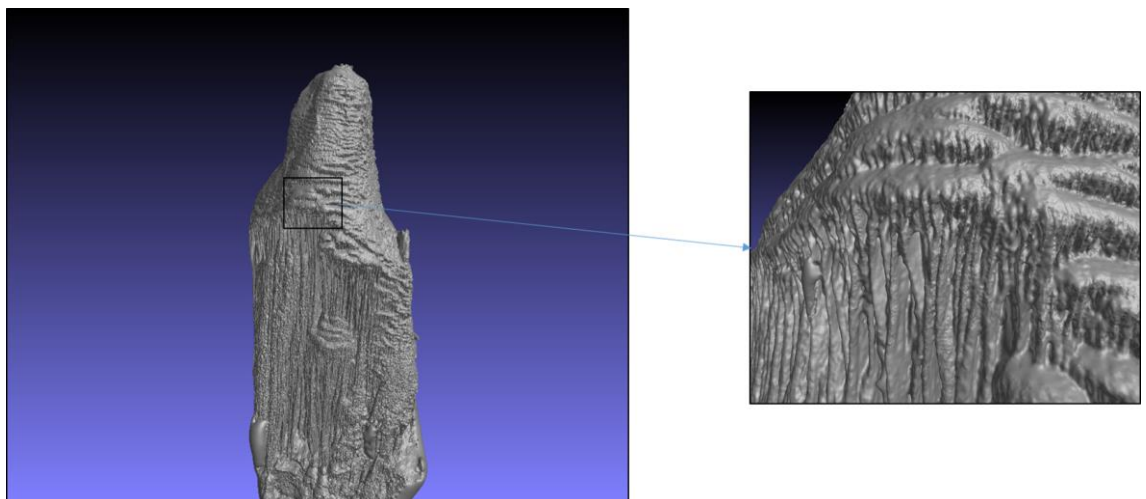


Figura 13- Exemplo de alta resolução passível de ser obtida por geração de malha a partir de nuvem de pontos densa.

O *software* SCENE 7.0 é o meio ao qual se teve acesso à nuvem de pontos completa e sob o qual é possível que não se realize simplificações. Entretanto, para que a malha seja

gerada é necessário que uma primeira simplificação de pontos seja realizada para que se exportem os dados para o *Meshlab*. Neste processo, foi perceptível que há uma diferença entre os dois programas no que se refere à capacidade de manuseio dos dados, uma vez que não foi possível trabalhar com a nuvem de pontos original (1,15 bilhões de pontos) no *Meshlab*.

Apesar disso, a partir da nuvem obtida pelo processo de subamostragem (17,2 milhões de pontos), outras simplificações foram realizadas, pelo uso da ferramenta *Point Cloud Simplification*, e nuvens de pontos com menores densidades de pontos foram obtidas.

Quanto menor o número de pontos presentes na nuvem, menos detalhada é a *mesh* gerada. Além disso, os valores de área superficial obtidos foram proporcionalmente menores de acordo com o aumento da simplicidade da malha. Entretanto, os valores de volume obtidos se mantiveram semelhantes (Tabela 1).

Número de pontos	Tamanho da nuvem	Tamanho do mesh	Volume (m ³)	Área superficial (m ²)
1,15 bilhões de pontos ("crua")	2640 MB	Não foi feita	-	-
17,2 milhões	1020 MB	762 MB	74434	41905
1 milhão	25,7 MB	141 MB	75145	40792
500 mil	9,86 MB	38 MB	73318	35295
250 mil	4,97 MB	21,9 MB	73438	32500
50 mil	1,13 MB	4,50 MB	74055	27295

Tabela 1 - Comparação entre nuvens de pontos e malhas subsequentemente geradas.

Feições estruturais importantes, já destacadas por Cordeiro (2013), foram observadas no *mesh* gerado (Figura 14). Ressalta-se que as localizações das duas fraturas aqui indicadas e da fenda inferida são muito semelhantes às estruturas destacadas por Cordeiro (2013) (Anexo 7).

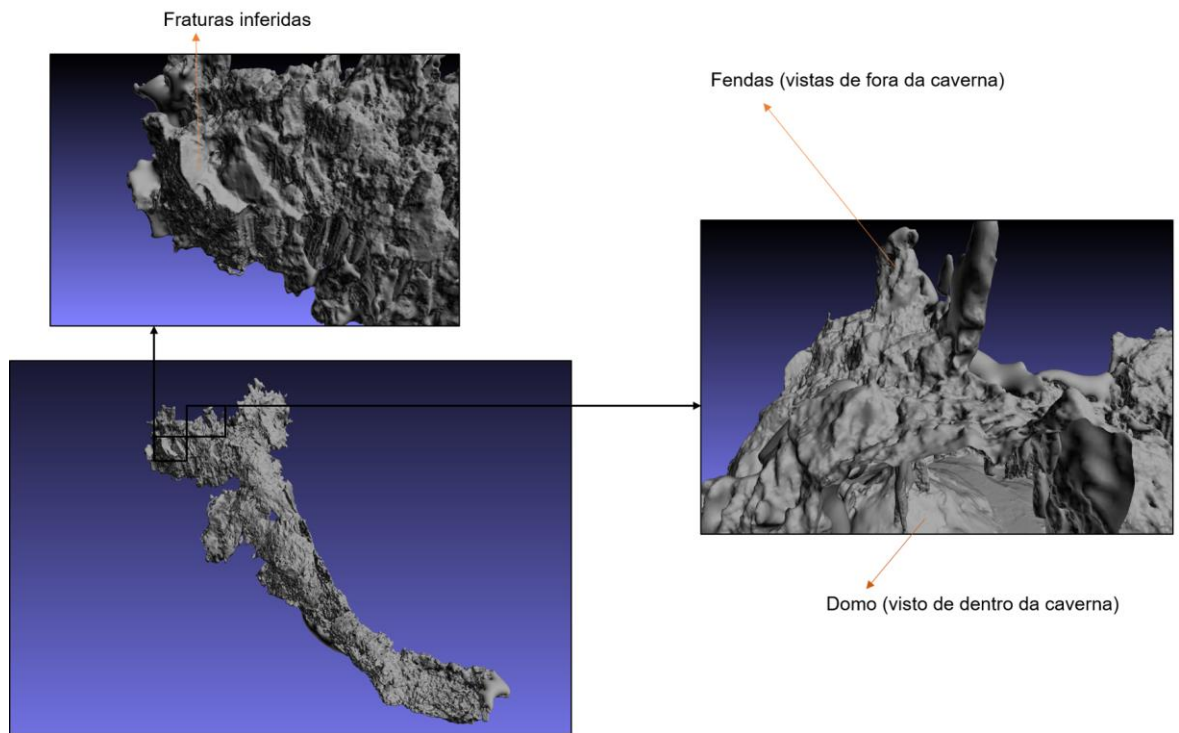


Figura 14 - Destaque para as feições estruturais perceptíveis ao ser realizada análise do modelo pelo se entorno.

Existem outros métodos de escaneamento à *laser* apresentados na literatura que promovem, por exemplo, uma dinâmica de trabalho mais rápida e a possibilidade de minimizar a produção de “áreas de sombra” na nuvem de pontos, como o método do *Mobile Mapping* (Zlot e Bosse, 2014), que independe da fixação de equipamentos de TLS sobre tripés para a realização de cada varredura.

Em ambientes cavernícolas como este, é possível que equipamentos como o utilizado no presente trabalho não sejam suficientes para o mapeamento completo da caverna, uma vez que o acesso às partes não turísticas da caverna pode dificultar a mobilidade da equipe. Além disso, equipamentos ainda mais leves, acessíveis e simples são atualmente apresentados pela literatura (Gáti et al., 2016)

9. CONCLUSÕES

Dada a realização deste trabalho baseado na adoção do TLS para o mapeamento de cavernas e a consulta do que se tem realizado nesta área por outros pesquisadores (Buckley, 2007; Buckley et al., 2008; Gallay et al., 2015; Gallay et al., 2016; Silvestre, 2014), permitiu-se vislumbrar que o desenvolvimento e aplicação destas tecnologias mudará a dinâmica de trabalho e os resultados passíveis de serem obtidos no mapeamento espeleológico.

A precisão dos dados obtidos a partir destes equipamentos e a grande quantidade de pontos coletados possibilitam que uma caracterização muito detalhada seja feita. Em relação aos métodos tradicionais de mapeamento espeleológico, como os adotados em Silvério (2014), destaca-se a maior velocidade com que se pode fazer um mapeamento detalhado pelo uso do TLS, além da maior facilidade nos cálculos de volumes, áreas e distâncias.

É importante ressaltar que podem ser feitas simplificações em relação à nuvem de pontos, o que diminui seu tamanho e a concede potencial para ser visualizada e manuseada mais facilmente em computadores providos de processadores comuns, além de facilitar a transferência de dados dos dados.

No sentido contrário, outra possibilidade que este tipo de trabalho proporciona é o acesso à nuvem de pontos original (totalidade dos dados) para conferência e detalhamento de determinadas feições.

Além disso, o conhecimento e obtenção de experiência nesta área permite que a solução de questões específicas se torne mais rápida. Com o objetivo único de se obter o volume interno de uma caverna, por exemplo, é possível que nuvens de pontos simplificadas gerem valores tão precisos quanto a nuvem de pontos de alto detalhe (alta densidade de pontos) (Tabela 1).

Existem trabalhos publicados que já adotam tecnologias derivadas a partir do TLS, que permitem a execução de atividades de escaneamento a laser durante o movimento de uma pessoa, ao caminhar dentro de uma caverna (Gáti et al., 2016; Zlot e Bosse, 2014). Estes equipamentos de escaneamento à laser móveis são essenciais para mapeamento de cavernas em que os grandes salões e dutos se interligam por dutos de menor espessura. Desta maneira, poderiam ser usados os equipamentos de TLS nos dutos maiores e nos salões, uma vez que eles possuem maior alcance. Já os escaneamentos móveis, são ideias para as porções mais estreitas da caverna.

Assim como os dados obtidos por estes dois tipos de equipamentos podem ser integrados em um só projeto, a depender do objetivo, é possível que se utilize outros métodos dentro de um mesmo trabalho, como a fotogrametria (Lerma et al., 2012).

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo R.N., Muniz F., Silva B.R., Brandi I. (2015). Controle morfológico de cavidades com a utilização de *Laser Scanner*. XXXIII Congresso Brasileiro de Espeleologia, São Paulo:

SBE/SEE, *Anais*. Acesso em 21 de maio de 2018, <http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_321-327.pdf>.

Auler A. & Zogbi L. (2005). *Espeleologia: Noções básicas*. São Paulo: Redespeleo Brasil.

Bernardini F., Mittleman J., Rushmeier H., Silva C., Taubin G. (1999). The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, v. 5, p 349–359.

Brandi R. (2007). Ricardo Krone e Lourenço Granato: Influências na história da espeleologia paulista no final do século XIX e início do século XX. *O Carste*. 36-60.

Buckley S.J., Howell J.A., Enge H.D., Kurz T.H. (2008). *Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations*. *Journal of the Geological Society*, v.165, 625-638.

Campanha G.A.C., Gimenez Filho A., Caetano S.L.V., Pires F.A., Dantas A.S.L., Teixeira A.L., Dehira L.K. (1985). Geologia e estratigrafia da região das folhas Iporanga e Gruta do Diabo, Vale do Ribeira, São Paulo. *XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia*, v.2, 1058-1073, Goiânia: SBG

Campanha G.A.C. (1991). Tectônica Proterozóica no Alto e Médio Vale do Ribeira, Estados de São Paulo e Paraná. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências. USP.

Campanha G.A.C., Sadowski G.R. (1999). *Tectonics of the southern portion of the Ribeira Belt (Apiaí Domain)*. *Precambrian Research*, v.98, 31-51.

Campanha G.A.C. (2002) - O papel do sistema de zonas de cisalhamento transcorrente da porção meridional da Faixa Ribeira. Tese (Habilitação). Instituto de Geociências, USP

Cordeiro B. M. (2013). Planalto carbonático do André Lopes (SP): geomorfologia cártica e geoespeleologia da Gruta da Tapagem (Caverna do Diabo). Tese (mestrado). Instituto de Geociências. USP.

Cintra J. P. (1997). *Topografia Básica* – São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Figueiredo L.A.V., Zampaulo R.A., Geribello F.K., Pedro E.G., Dell'Antonio R., Lobo H.A.S. (2007). Projeto Caverna do Diabo (PROCAD): aspectos históricos (1990-2007) e resultados das expedições da terceira fase. *XXIX Congresso Brasileiro de Espeleologia*,

Ouro Preto: SBE/SEE, *Anais* Acesso em 21 de fevereiro de 2018, <<http://www.repositorium.fsa.br/handle/10663/131>>.

Figueiredo L.A.V. (2010). A invenção do fenômeno espeleoturístico: considerações internacionais e suas influências no turismo em cavernas brasileiras. *VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física, II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física*, FSA/SBE. Acesso em 21 de fevereiro de 2018, <<http://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/tema5/luiz>>.

Gallay M., Kanuk J., Hochmuth Z., Meneely J.D., Hofierka J., Sedlak V. (2015). 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*, Official Journal of Union Internationale de Spéléologie, v.44, p277-291. Acesso em 23 de maio de 2018, <<http://scholarcommons.usf.edu/ijs/vol44/iss3/>>.

Gallay M., Hochmuth Z., Kanuk J., Hofierka J. Geomorphometric analysis of cave ceiling channels mapped with 3-D terrestrial laser scanning. (2016). *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v.20, p1827-1849. Acesso em 23 de maio de 2018, <www.hydrol-earth-syst-sci.net/20/1827/2016/>.

Gáti A., Rehány N., Fekete Z., Holl B., Sűrű P. (2016). The Poor Man's Laser Scanner: a Simple Method of 3D Cave Surveying. *CREG-Journal* 96, 8-14.

IGC – INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO DO ESTADO DE SÃO PAULO 1998. Folha Córrego das Ostras, SG.22-X-B-VI-1-SO-B, mapa topográfico escala 1:10.000.

Kazhdan M.M., Hoppe H. (2013). Screened poisson surface reconstruction. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, n.29, v.32.

Perrota M.M., Salvador E.D., Lopes R.C., D'Agostino L.Z., Peruffo N., Gomes S.D., Sachs L.L.B., Meira V.T., Gargia M.G.M., Lacerda Filho J.V. (2005). Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000, Programa Geologia do Brasil – PGB, CPRM, São Paulo.

Person A. L. 2013. Mapeamento espeleológico de detalhe do setor turístico da gruta da Tapagem (Caverna do Diabo) – SP. Tese (Monografia de trabalho de formatura), Instituto de Geociências. USP.

Karmann I. (1994). Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto Vale do Rio Ribeira de Iguape, sudeste do estado de São Paulo. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências. USP.

Lerma J.L., Navarro S., Cabrelles M., Villaverde V. (2010). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, v. 37, p 499-507.

Lobo H.A.S., Trajano E., Marinho M.A., Bichuette M.E., Scaleante J.A.B., Scaleante O.A.F., Rocha B.N., Laterza F.V. (2012). Projection of tourist scenarios onto fragility maps: framework for determination of provisional tourist carrying capacity in a Brazilian show cave. *Tourism Management*, **35**:234-243.

Lott, C. F. S. (2005). Cartografia espeleológica: dos mais primitivos às experiências atuais em mapeamento de caverna. *Pedagogia em Ação (PUC-MG)*. v. 5, p.

Silvério M.O. (2014). Atuação da arquitetura no uso público de cavernas. Conceitos, métodos e estratégias para ocupação. Caverna do Diabo, SP. São Paulo: Tese (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. USP.

Silvestre I., Rodrigues J. I., Figueiredo M., Veiga-Pires C. (2013). *Cave chambre data modeling and 3D Web visualization. XVII International Conference on Information Visualisation*, Londres: IEEE.

Silvestre I., Rodrigues J. I., Figueiredo M., Veiga-Pires C. V. (2014). High-resolution digital 3D models of Algar do Penico Chamber: limitations, challenges, and potential. *XVII International Journal of Speleology*, Tampa: UIS

Sallun Filho W., Cordeiro B.M., Karmann I. (2015). Structural and hydrological controls on the development of a river cave in marble (Tapagem Cave - SE Brazil). *International Journal of Speleology*, 44, 75-90.

Zlot R., Bosse M. (2014). Three-dimensional mobile mapping of caves. In: *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 76, no. 3, 191–206.

ANEXOS

1. Coordenadas precisas apresentadas no relatório do processamento realizado no software *Spectra Precision Office* para o ponto fx1.
2. Coordenadas precisas apresentadas no relatório do processamento realizado no software *Spectra Precision Office* para o ponto fx2.
3. Coordenadas precisas apresentadas no relatório do processamento realizado no software *Spectra Precision Office* para o ponto P07.
4. Tabela com os dados de visadas obtidos pelo trabalho topográfico de campo e coordenadas calculadas para cada ponto a partir do software *Datageosis Office*.
5. Planta do trecho turístico da Caverna do Diabo elaborada a partir dos dados obtidos pelo escaneamento a laser.
6. Comparação entre os dados do mapa de Silvério (2014) com os obtidos pelo *Laser Scanner*.
7. Comparação entre os dados do mapa da SBE com os obtidos pelo *Laser Scanner*.

Anexo 1: Coordenadas precisas apresentadas no relatório do processamento realizado no *software* Spectra Precision Office para o ponto fx1.

Dados do arquivo do projeto		Sistema de coordenadas	
Nome:		Nome:	World wide/UTM
Tamanho:		Datum:	WGS 1984
Modificado:	09/01/2018 16:15:16 (UTC:-7)	Zona:	22 South
Fuso horário:	Hora Padrão das Montanhas	Geóide:	EGM96 (Global)
Número de Referência:		Datum vertical:	
Descrição:		Local calibrado:	
Comentário 1:			
Comentário 2:			
Comentário 3:			

Relatório de processamento das linhas de base

Resumo do processamento

Observação	De	Para	Tipo de solução	Precisão de H (Metro)	Prec. V (Metro)	Azimuth geodésico	Distância do elip. (Metro)	ΔAltura (Metro)
UFPR --- base_dia2 (B2)	UFPR	base_dia2	Fixo	0,022	0,069	43°00'54"	122708,189	-470,730

Resumo da aceitação

Data do Processamento	Passado	Valor		Falha	
1	1	0		0	

UFPR - base_dia2 (10:11:30-15:49:28) (S2)

Observação de linha de base:	UFPR --- base_dia2 (B2)
Data do Processamento:	31/07/2018 13:18:10
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,022 m
Precisão vertical:	0,069 m
RMS:	0,015 m
PDOP Máximo:	6,847
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	09/07/2018 10:11:42 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	09/07/2018 15:49:12 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	05:37:30
Intervalo de processamento:	2 Minutos

Componentes do vetor (marca a marca)

De:	UFPR				
	Grid		Local		Global
Direção leste	677878,516 m	Latitude	S25°26'54,12695"	Latitude	S25°26'54,12695"
Direção norte	7184223,309 m	Longitude	W49°13'51,43717"	Longitude	W49°13'51,43717"
Elevação	922,129 m	Altura	925,807 m	Altura	925,807 m

Para:	base_dia2				
	Grid		Local		Global
Direção leste	762769,782 m	Latitude	S24°38'09,95624"	Latitude	S24°38'09,95624"
Direção norte	7272863,056 m	Longitude	W48°24'15,01095"	Longitude	W48°24'15,01095"
Elevação	456,067 m	Altura	455,078 m	Altura	455,078 m

Vetor					
ΔDireção leste	84891,266 m	Azimute de avanço NS	43°00'54"	ΔX	87599,019 m
ΔDireção norte	88639,747 m	Distância do elip.	122708,189 m	ΔY	26597,234 m
ΔElevação	-466,062 m	ΔAltura	-470,730 m	ΔZ	81727,115 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,007 m	σ Azimute de avanço NS	0°00'00"	σ ΔX	0,022 m
σ Δ Norte	0,007 m	σ Dist. elipsoide	0,009 m	σ ΔY	0,025 m
σ Δ Elevação	0,035 m	σ ΔAltura	0,035 m	σ ΔZ	0,016 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0004623933		
y	-0,0004800397	0,0006050178	
Z	-0,0002686209	0,0003664132	0,0002577855

Anexo 2: Coordenadas precisas apresentadas no relatório do processamento realizado no software *Spectra Precision Office* para o ponto fx2.

NEIA - ponto_estacionamento (17:05:16-17:35:27) (S3)

Observação de linha de base:	NEIA --- ponto_estacionamento (B3)
Data do Processamento:	31/07/2018 10:44:48
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,033 m
Precisão vertical:	0,094 m
RMS:	0,013 m
PDOP Máximo:	2,215
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	08/07/2018 17:05:42 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	08/07/2018 17:35:12 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	00:29:30
Intervalo de processamento:	30 segundos

Componentes do vetor (marca a marca)

De: NEIA					
Grid		Local		Global	
Direção leste	810346,035 m	Latitude	S25°01'12,86150"	Latitude	S25°01'12,86150"
Direção norte	7229286,667 m	Longitude	W47°55'29,88667"	Longitude	W47°55'29,88667"
Elevação	7,938 m	Altura	6,055 m	Altura	6,055 m

Para: ponto_estacionamento					
Grid		Local		Global	
Direção leste	762725,222 m	Latitude	S24°38'08,62777"	Latitude	S24°38'08,62777"
Direção norte	7272904,799 m	Longitude	W48°24'16,62240"	Longitude	W48°24'16,62240"
Elevação	449,196 m	Altura	448,018 m	Altura	448,018 m

Vetor					
ΔDireção leste	-47620,813 m	Azimute de avanço NS	311°11'44"	ΔX	-23931,114 m
ΔDireção norte	43618,133 m	Distância do elip.	64537,948 m	ΔY	-45965,929 m
ΔElevação	441,258 m	ΔAltura	441,962 m	ΔZ	38471,271 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,011 m	σ Azimute de avanço NS	0°00'00"	σ ΔX	0,034 m
σ Δ Norte	0,009 m	σ Dist. elipsoide	0,013 m	σ ΔY	0,026 m
σ Δ Elevação	0,048 m	σ ΔAltura	0,048 m	σ ΔZ	0,026 m

Dados do arquivo do projeto		Sistema de coordenadas	
Nome:		Nome:	Brazil/SIRGAS2000
Tamanho:		Datum:	SIRGAS2000
Modificado:	09/01/2018 16:15:16 (UTC:-7)	Zona:	UTM zone 22S
Fuso horário:	Hora Padrão das Montanhas	Geóide:	Brazil SIRGAS Geoid Model 2015
Número de Referência:		Datum vertical:	
Descrição:		Local calibrado:	
Comentário 1:			
Comentário 2:			
Comentário 3:			

Relatório de processamento das linhas de base

Resumo do processamento

Observação	De	Para	Tipo de solução	Precisão de H (Metro)	Prec. V (Metro)	Azimute geodésico	Distância do elip. (Metro)	ΔAltura (Metro)
NEIA --- ponto_estacionamento (B3)	NEIA	ponto_estacionamento	Fixo	0,033	0,094	311°11'44"	64537,948	441,962

Resumo da aceitação

Data do Processamento	Passado	Valor		Falha	
1	1	0		0	

Anexo 3: Coordenadas precisas apresentadas no relatório do processamento realizado no *software Spectra Precision Office* para o ponto P07.

Dados do arquivo do projeto		Sistema de coordenadas	
Nome:		Nome:	Brazil/SIRGAS2000
Tamanho:		Datum:	SIRGAS2000
Modificado:	09/01/2018 16:15:16 (UTC:-7)	Zona:	UTM zone 22S
Fuso horário:	Hora Padrão das Montanhas	Geóide:	Brazil SIRGAS Geoid Model 2015
Número de Referência:		Datum vertical:	
Descrição:		Local calibrado:	
Comentário 1:			
Comentário 2:			
Comentário 3:			

Relatório de processamento das linhas de base

Resumo do processamento

Observação	De	Para	Tipo de solução	Precisão de H (Metro)	Prec. V (Metro)	Azimute geodésico	Distância do elip. (Metro)	ΔAltura (Metro)
NEIA --- base_dia3 (B3)	NEIA	base_dia3	Fixo	0,024	0,096	311°10'02"	64142,282	435,891

Resumo da aceitação

Data do Processamento	Passado	Valor		Falha	
1	1	0		0	

NEIA - base_dia3 (10:48:39-13:02:42) (S3)

Observação de linha de base:	NEIA --- base_dia3 (B3)
Data do Processamento:	31/07/2018 13:36:18
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,024 m
Precisão vertical:	0,096 m
RMS:	0,017 m
PDOP Máximo:	5,096
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	10/07/2018 10:48:42 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	10/07/2018 13:02:42 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	02:14:00
Intervalo de processamento:	30 segundos

Componentes do vetor (marca a marca)

De:	NEIA				
	Grid		Local		Global
Direção leste	810346,035 m	Latitude	S25°01'12,86150"	Latitude	S25°01'12,86150"
Direção norte	7229286,667 m	Longitude	W47°55'29,88667"	Longitude	W47°55'29,88667"
Elevação	7,938 m	Altura	6,055 m	Altura	6,055 m

Para:	base_dia3				
	Grid		Local		Global
Direção leste	762995,749 m	Latitude	S24°38'17,90439"	Latitude	S24°38'17,90439"
Direção norte	7272614,074 m	Longitude	W48°24'06,81390"	Longitude	W48°24'06,81390"
Elevação	443,124 m	Altura	441,946 m	Altura	441,946 m

Vetor					
ΔDireção leste	-47350,286 m	Azimute de avanço NS	311°10'02"	ΔX	-23807,472 m
ΔDireção norte	43327,407 m	Distância do elip.	64142,282 m	ΔY	-45689,668 m
ΔElevação	435,186 m	ΔAltura	435,891 m	ΔZ	38214,337 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,007 m	σ Azimute de avanço NS	0°00'00"	σ ΔX	0,027 m
σ Δ Norte	0,007 m	σ Dist. elipsoide	0,010 m	σ ΔY	0,039 m
σ Δ Elevação	0,049 m	σ ΔAltura	0,049 m	σ ΔZ	0,016 m

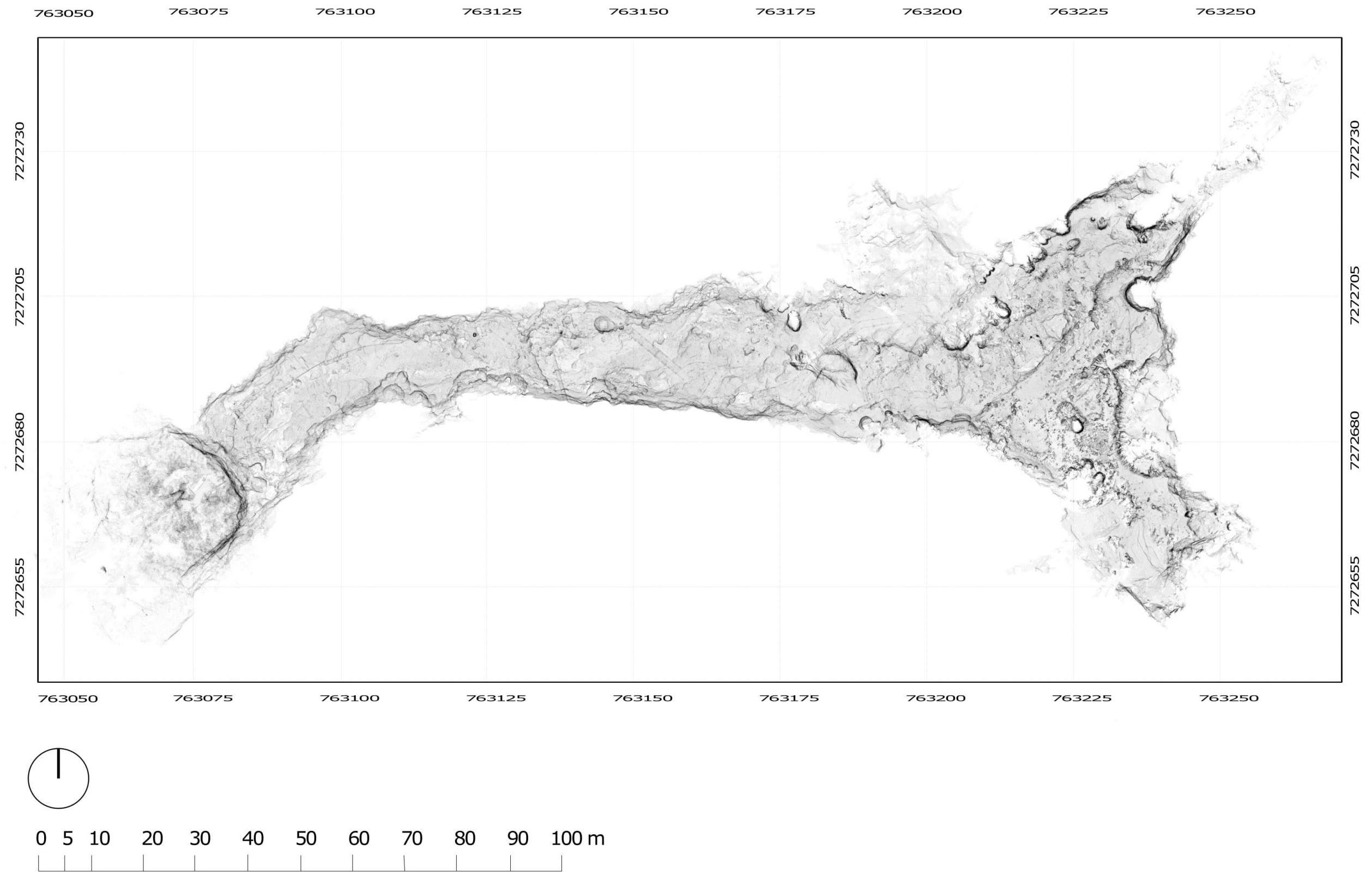
Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0007149365		
y	-0,0010292286	0,0015136653	
Z	-0,0004320230	0,0006056915	0,0002713982

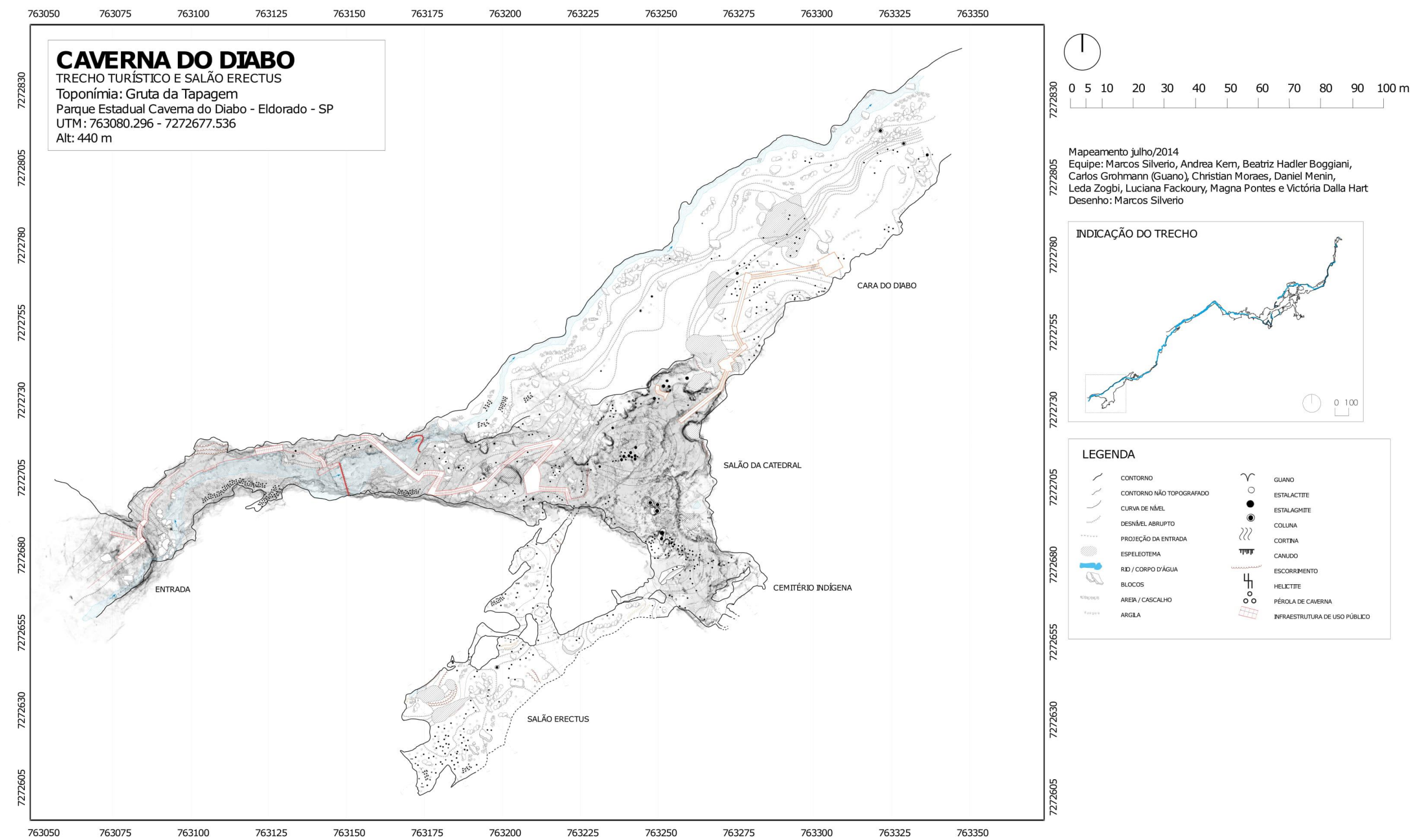
Anexo 4: Tabela com os dados de visadas obtidos pelo trabalho topográfico de campo e coordenadas calculadas para cada ponto a partir do *software Datageosis Office*.

eq TOPCON GPT -3200NW	op	uv	Zenital																
pt FX1	ds AUX	x	762769.782	y	7272863.056	z	456.067												
pt FX2	ds AUX	x	762725.222	y	7272904.799	z	449.196												
pt FX1	ds EST	ai	1.585																
pt FX2	ds RE	ah	0°00'00"	av	96°59'13"	di	61.512	ap	1.410										
pt P01	ds VANTE	ah	184°30'52"	av	90°26'35"	di	55.259	ap	1.410	x	762807.010	y	7272822.222	z	455.815				
pt P01	ds EST	ai	1.625																
pt FX1	ds RE	ah	0°00'00"	av	89°58'04"	di	55.258	ap	1.410										
pt P02	ds VANTE	ah	135°35'22"	av	96°46'09"	di	54.375	ap	1.410	x	762860.920	y	7272819.175	z	449.621				
pt P02	ds EST	ai	1.498																
pt P01	ds RE	ah	0°00'00"	av	88°56'38"	di	54.361	ap	1.410										
pt P03	ds VANTE	ah	203°18'09"	av	90°41'30"	di	46.371	ap	1.439	x	762902.403	y	7272798.459	z	449.120				
pt P03	ds EST	ai	1.438																
pt P02	ds RE	ah	0°00'00"	av	89°25'15"	di	46.372	ap	1.410										
pt P04	ds VANTE	ah	152°46'44"	av	91°41'48"	di	47.560	ap	1.450	x	762949.939	y	7272799.027	z	447.700				
pt P04	ds EST	ai	1.500																
pt P03	ds RE	ah	0°00'00"	av	88°20'57"	di	47.587	ap	1.450										
pt P05	ds VANTE	ah	217°07'25"	av	93°50'22"	di	74.423	ap	1.450	x	763009.676	y	7272754.921	z	442.766				
pt P05	ds EST	ai	1.500																
pt P04	ds RE	ah	0°00'00"	av	86°13'57"	di	74.423	ap	1.450										
pt P06	ds VANTE	ah	196°24'17"	av	92°36'46"	di	25.459	ap	1.450	x	763025.037	y	7272734.652	z	441.656				
pt P06	ds EST	ai	1.540																
pt P05	ds RE	ah	0°00'00"	av	87°41'09"	di	25.437	ap	1.450										
pt P07	ds VANTE	ah	144°05'42"	av	94°50'18"	di	45.889	ap	1.450	x	763068.779	y	7272721.329	z	437.875				
pt P07	ds EST	ai	1.420																
pt P06	ds RE	ah	0°00'00"	av	85°13'12"	di	45.860	ap	1.450										
pt P08	ds VANTE	ah	102°55'53"	av	95°15'53"	di	35.653	ap	1.450	x	763086.461	y	7272752.115	z	434.574				
pt P08	ds EST	ai	1.530																
pt P07	ds RE	ah	0°00'00"	av	86°46'40"	di	35.648	ap	1.450										
pt P09	ds VANTE	ah	153°19'42"	av	85°33'50"	di	71.016	ap	1.650	x	763090.412	y	7272822.808	z	439.947				
pt P09	ds EST	ai	1.620																
pt P08	ds RE	ah	0°00'00"	av	94°30'32"	di	71.024	ap	1.410										
pt B2	ds AUX	ah	245°16'08"	av	124°22'22"	di	8.631	ap	0.000	x	763097.038	y	7272825.423	z	436.694				
pt B1	ds AUX	ah	241°02'37"	av	125°27'57"	di	9.269	ap	0.000	x	763097.211	y	7272826.089	z	436.189				
pt B4	ds AUX	ah	259°58'42"	av	126°33'32"	di	8.247	ap	0.000	x	763096.989	y	7272823.595	z	436.654				
pt B3	ds AUX	ah	252°49'54"	av	128°49'38"	di	8.560	ap	0.000	x	763096.883	y	7272824.418	z	436.200				
pt R1	ds AUX	ah	253°47'27"	av	112°59'56"	di	15.185	ap	0.000	x	763104.031	y	7272825.955	z	435.634				
pt R2	ds AUX	ah	220°31'24"	av	96°25'23"	di	10.246	ap	0.000	x	763097.449	y	7272830.167	z	440.420				
pt R3	ds AUX	ah	261°34'23"	av	94°29'35"	di	14.862	ap	0.000	x	763105.166	y	7272824.158	z	440.402				
pt P10	ds VANTE	ah	247°39'03"	av	132°37'06"	di	8.798	ap	0.000	x	763096.528	y	7272824.932	z	435.609				
pt P10	ds EST	ai	1.530																
pt P09	ds RE	ah	0°00'00"	av	55°27'16"	di	7.859	ap	2.050										
pt P11	ds VANTE	ah	104°52'03"	av	111°20'49"	di	20.709	ap	1.850	x	763095.087	y	7272844.167	z	427.751				
pt P11	ds EST	ai	1.380																
pt P10	ds RE	ah	0°00'00"	av	67°09'03"	di	20.930	ap	1.650										
pt P12	ds VANTE	ah	221°07'57"	av	90°53'29"	di	53.724	ap	1.410	x	763127.302	y	7272887.152	z	426.885				
pt P12	ds EST	ai	1.390																
pt P11	ds RE	ah	0°00'00"	av	89°07'07"	di	53.725	ap	1.410										
pt P13	ds VANTE	ah	189°37'47"	av	70°33'52"	di	84.098	ap	1.410	x	763184.809	y	7272941.763	z	454.849				
pt P13	ds EST	ai	1.470																
pt P12	ds RE	ah	0°00'00"	av	109°27'32"	di	84.108	ap	1.410										
pt P14	ds VANTE	ah	173°49'09"	av	96°08'57"	di	33.601	ap	1.550	x	763206.416	y	7272967.243	z	451.169				
pt P14	ds EST	ai	1.595																
pt P13	ds RE	ah	0°00'00"	av	93°46'43"	di	33.609	ap	1.550										
pt P15	ds VANTE	ah	100°15'28"	av	89°11'02"	di	21.841	ap	1.560	x	763192.542	y	7272984.108	z	451.515				
pt P15	ds EST	ai	1.600																
pt P14	ds RE	ah	0°00'00"	av	90°59'16"	di	21.858	ap	1.560										
pt B5	ds AUX	ah	353°47'54"	av	94°58'57"	di	19.084	ap	0.000	x	763206.136	y	7272970.817	z	451.458				
pt B6	ds AUX	ah	6°50'54"	av	98°27'25"	di	6.563	ap	0.000	x	763196.039	y	7272978.639	z	452.150				
pt B7	ds AUX	ah	130°00'41"	av	100°24'05"	di	8.652	ap	0.000	x	763184.032	y	7272984.192	z	451.553				

Anexo 5: Planta do trecho turístico da Caverna do Diabo elaborada a partir dados obtidos pelo Laser Scanner



Anexo 6: Comparação entre os dados do mapa de Silvério (2014) com os obtidos pelo Laser Scanner



Anexo 7: Comparação entre os dados do mapa da SBE com os obtidos pelo Laser Scanner

Desenho e Mapa Original:
Sociedade Brasileira de Espeleologia
(SBE, 2008))
Gruta da Tapagem - SP 002

Localização(UTM)
Datum (WGS84)
Sumidouro: 7272654S/763171W
Ressurgência: 7273687S/765027W
Entrada da OTRAS: 7273809S/765039W

Projeção Horizontal: 6.237m
Desnível: 175m
BCRA: Grau 4B

Perfis e Compilação Final:
Bruna Medeiros Cordeiro
William Sallun Filho

Equipe de Campo:
Josias Moreira
Juliane Jamile da Silva Pereira
Valdomiro Pereira

LEGENDA:

- drenagem
- desnível
- estalagmite
- estalactite
- estalactite e estalagmite
- cortina
- coluna
- escorrimento
- travertino
- bloco
- acamamento
- fratura
- escarpa

NG

100m

sbe

