

## **ATRIBUTOS ESPELEOMÉTRICOS**

Aprimoramentos Metodológicos para o  
Levantamento de Atributos Espeleométricos no  
Licenciamento Ambiental



**TCCE ICMBio  
VALE**

RELATÓRIO FINAL  
TCCE Vale 2018. Subprojeto 8

Coordenação:  
JOCY BRANDÃO CRUZ

Equipe técnica:  
Allan Silas Calux  
Jocy Brandão Cruz

# Sumário

1. Introdução.....	3
2. Referencial Técnico-Científico .....	5
2.1. Atributos espeleométricos no contexto do licenciamento ambiental.....	5
2.2. Topografia espeleológica convencional: fundamentos, limitações e controle de qualidade	5
2.3. Escaneamento tridimensional, processamento e potencial analítico .....	6
2.4. Evidências comparativas, integração metodológica e implicações regulatórias .....	7
3. Limitações e desafios metodológicos no levantamento de atributos espeleométricos.....	9
3.1. Limitações e desafios metodológicos da topografia espeleológica convencional e do escaneamento tridimensional .....	9
3.2. Equivalência conceitual, incertezas e implicações na interpretação dos resultados.....	11
4. Análise integrada dos resultados comparativos .....	12
4.1. Base de dados analisada e procedimentos adotados.....	12
4.2. Comparação entre volumes obtidos por topografia convencional e escaneamento tridimensional.....	13
4.3. Relação entre a variação volumétrica e atributos geométricos da cavidade .....	14
4.4. Influência da densidade de seccionamento na estimativa volumétrica .....	16
4.5. Síntese interpretativa dos resultados .....	17
5. Integração de abordagens estatísticas como subsídio à definição de atributos espeleométricos .....	17
5.1 Métricas estatísticas para a classificação de atributos dimensionais de cavernas .....	18
5.2. Síntese integrada dos estudos estatísticos e resultados aplicados.....	18
5.3 Seminário Técnico-Científico Dimensões Notáveis de Cavidade Natural Subterrânea.....	21
6. Conclusões E Recomendações .....	23
6.1 Recomendações finais .....	24
7. Referências bibliográficas .....	25

## 1. Introdução

O patrimônio espeleológico brasileiro constitui um conjunto singular de bens naturais de elevado valor científico, ambiental, cultural e paisagístico, cuja proteção está assegurada por um arcabouço legal específico no âmbito do licenciamento ambiental. Desde a promulgação do Decreto Federal nº 99.556/1990, posteriormente alterado pelo Decreto nº 6.640/2008, a topografia de cavernas passou a desempenhar papel central nos estudos espeleológicos exigidos nos processos de licenciamento, consolidando-se como base técnica indispensável para a caracterização, análise e valoração das cavidades naturais subterrâneas (CECAV, 2025; BRASIL, 1990; BRASIL, 2008).

No contexto normativo vigente, os atributos espeleométricos, projeção horizontal, desnível, área e volume (Tabela 1), assumem relevância determinante na classificação do grau de relevância das cavernas. Em particular, o volume destaca-se como um parâmetro quantitativo de grande peso decisório, podendo, isoladamente ou em conjunto com outros atributos, conduzir ao enquadramento de uma cavidade como de relevância máxima, alta, média ou baixa, conforme critérios estatísticos estabelecidos pela legislação espeleológica brasileira (CECAV, 2025).

Atributo	Und	Descrição sintética	Papel na classificação de relevância
Projeção horizontal	m	Comprimento projetado do eixo principal da cavidade no plano horizontal	Utilizada como critério estatístico para definição de relevância Pode elevar a cavidade a grau máximo quando enquadrada como dimensão notável
Área	m <sup>2</sup>	Área total ocupada pela cavidade em planta baixa	
Volume	m <sup>3</sup>	Espaço tridimensional total da cavidade	
Desnível	m	Diferença altimétrica entre o ponto mais alto e o mais baixo do piso	Pode elevar a cavidade ao alto grau de relevância

Tabela 1 – Atributos espeleométricos utilizados na classificação de relevância de cavernas.

Fonte: CECAV (2025); BRASIL (2017).

Apesar de sua definição conceitual clara, o cálculo do volume de cavernas apresenta limitações metodológicas importantes quando realizado a partir de levantamentos espeleotopográficos convencionais. Tradicionalmente, esse cálculo baseia-se no produto da área da planta pela sua altura média, calculada média a partir de seções transversais e longitudinais, procedimento fortemente dependente da quantidade, da distribuição espacial e da qualidade dessas seções. Como resultado, erros aleatórios e vieses metodológicos podem ser introduzidos, especialmente em cavidades de geometria complexa ou elevada variabilidade morfológica.

Estudos comparativos conduzidos no âmbito do licenciamento ambiental demonstraram empiricamente essas limitações. A análise realizada por Calux *et al.* (2017), envolvendo 25 cavernas ferríferas submetidas a levantamento com LiDAR (*light detection and ranging*), o também chamado escaneamento a laser, evidenciou discrepâncias significativas entre os volumes calculados a partir de topografias convencionais e aqueles extraídos de modelos tridimensionais gerados a partir de nuvens de pontos de alta densidade. Os resultados indicaram que o volume obtido por métodos tradicionais apresenta erro de natureza predominantemente aleatória, não sendo adequado como medida precisa quando comparado ao volume derivado de modelos tridimensionais, considerado a melhor aproximação disponível da geometria real da cavidade (CALUX *et al.*, 2017).

Paralelamente a essas constatações, o avanço tecnológico observado nas últimas décadas impulsionou a incorporação de novas ferramentas ao mapeamento de cavernas. O uso de sensores LiDAR portáteis, passou a se destacar como alternativa viável para a documentação tridimensional de cavidades, sobretudo em contextos geológicos desafiadores, como aqueles associados a rochas ferríferas e ferruginosas, onde a

interferência magnética compromete a confiabilidade de instrumentos tradicionais (LIMA, 2025). Experiências recentes demonstram ganhos expressivos em acurácia morfológica, precisão cartográfica e redução do tempo de exposição das equipes ao ambiente subterrâneo, além de diferenças relevantes nos valores de área e volume obtidos, com implicações diretas para a análise de relevância espeleológica (LIMA, 2025).

No entanto, a adoção dessas tecnologias não está isenta de desafios. O elevado custo dos equipamentos, a necessidade de capacitação técnica especializada, as limitações operacionais em ambientes com presença de água e a ausência de padronização normativa específica para levantamentos tridimensionais impõem a necessidade de avaliações criteriosas quanto à sua aplicabilidade no rito do licenciamento ambiental. Assim, torna-se fundamental compreender não apenas as vantagens, mas também as limitações e os contextos mais adequados para o emprego do escaneamento 3D, em articulação com os métodos tradicionais de topografia de cavernas.

<b>Critério</b>	<b>Topografia tradicional</b>	<b>Escaneamento a laser</b>
Princípio metodológico	Medições lineares, angulares e seções	Nuvem de pontos tridimensional
Forma de cálculo do volume	área da planta x altura das seções	Cálculo direto a partir do sólido 3D
Precisão geométrica	Dependente do número e distribuição de seções	Alta, com densidade de pontos elevada
Interferência magnética	Alta, sobretudo em cavernas ferríferas	Inexistente
Tempo de campo	Maior	Menor
Custo operacional	Baixo a médio	Elevado
Necessidade de equipe especializada	Moderada	Alta
Limitações principais	Erro aleatório no volume	Custo, água, logística e processamento
Reprodutibilidade dos resultados	Variável, dependente do topógrafo e das seções adotadas	Elevada, condicionada ao processamento
Rastreabilidade e auditoria posterior	Limitada ao produto cartográfico	Alta, com reprocessamento da nuvem de pontos
Dependência da geometria da cavidade	Elevada em ambientes complexos	Média

Tabela 2 – Comparação entre métodos tradicionais e tridimensionais de levantamento espeleotopográfico. Fonte: CALUX *et al.* (2017); LIMA (2025).

É nesse cenário que se insere o projeto “Aprimoramentos Metodológicos para o Levantamento de Atributos Espeleométricos no Rito do Licenciamento Ambiental”, desenvolvido no âmbito do Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica nº 1/2018, sob coordenação do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio/CECAV). O projeto foi concebido com o objetivo de avaliar criticamente a precisão dos métodos de cálculo do volume, comparar abordagens tradicionais e tridimensionais, ampliar a base de dados espeleométricos disponível e subsidiar a elaboração de diretrizes e protocolos técnicos que promovam maior confiabilidade e padronização dos dados utilizados no licenciamento ambiental.

Ao longo de sua execução, o projeto incorporou análises comparativas iniciais, experiências de campo em diferentes contextos geológicos, ampliação progressiva da base amostral e discussões técnicas alinhadas às diretrizes nacionais em elaboração pelo CECAV para o levantamento espeleotopográfico. Dessa forma, este relatório apresenta uma síntese integrada dos fundamentos conceituais, das abordagens metodológicas e dos resultados obtidos, com foco em suas implicações práticas para a qualificação dos estudos espeleológicos e para o aprimoramento do rito do licenciamento ambiental no Brasil.

## 2. Referencial Técnico-Científico

### 2.1. Atributos espeleométricos no contexto do licenciamento ambiental

A espeleometria compreende o conjunto de procedimentos técnicos destinados à quantificação das dimensões físicas das cavidades naturais subterrâneas, constituindo etapa fundamental dos estudos espeleológicos exigidos no contexto do licenciamento ambiental. No Brasil, os principais atributos espeleométricos utilizados incluem a projeção horizontal, o desnível, a área e o volume, os quais subsidiam a caracterização morfológica das cavidades e a aplicação dos critérios estatísticos empregados na classificação de relevância espeleológica (CECAV, 2025).

Entre esses atributos, o volume destaca-se por representar uma medida integrada da geometria tridimensional da cavidade, sendo amplamente utilizado como parâmetro decisório nos processos de licenciamento ambiental. Contudo, diferentemente de atributos lineares ou bidimensionais, o volume apresenta maior sensibilidade às metodologias de levantamento e cálculo adotadas, o que impõe desafios técnicos relevantes à sua determinação precisa.

### 2.2. Topografia espeleológica convencional: fundamentos, limitações e controle de qualidade

A topografia convencional de cavernas baseia-se em levantamentos lineares (distância, azimute e inclinação) combinados com croquis, plantas, perfis e seções, a partir dos quais se obtêm medidas derivadas (DAY, 2002). Esses procedimentos, ainda que consagrados, são dependentes de decisões de campo (escolha de estações, densidade de visadas, número e localização de seções) e, portanto, podem variar entre equipes, afetando sua reprodutibilidade e comparabilidade.

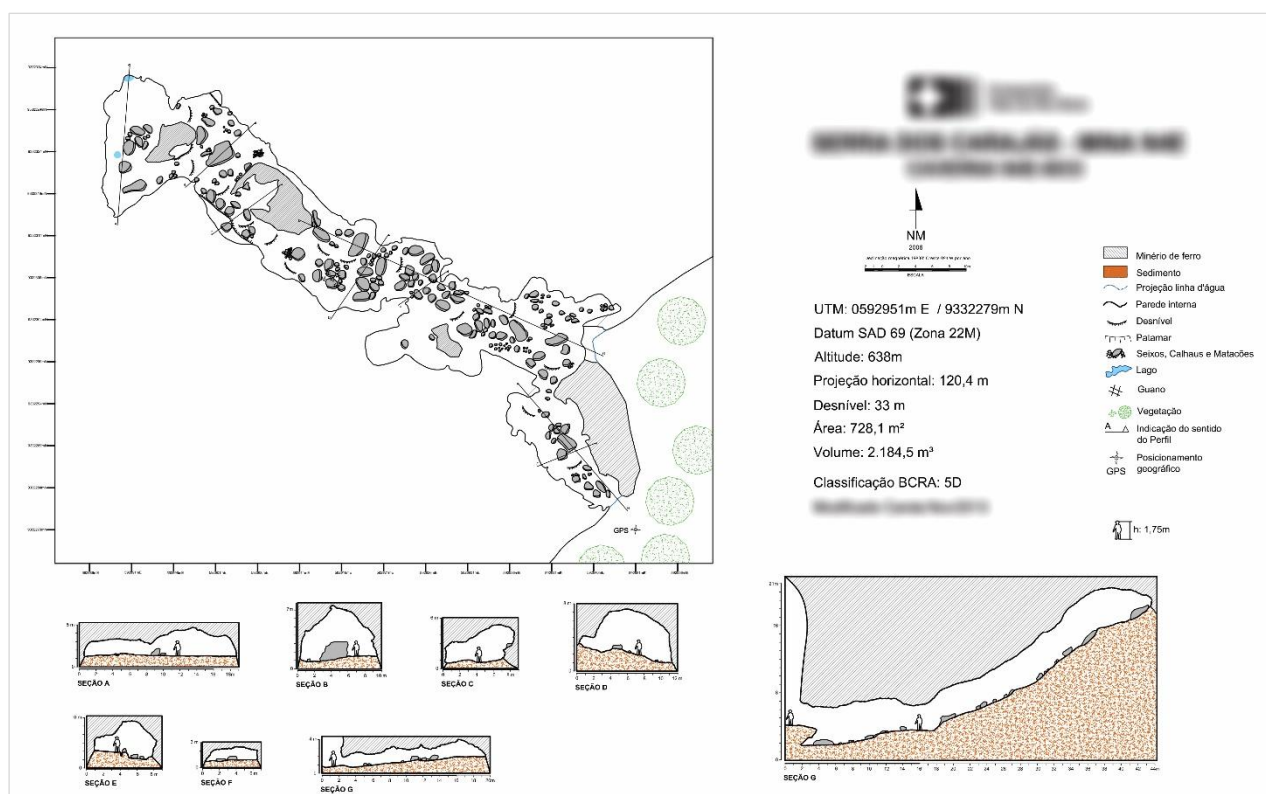


Figura 1 - Exemplo de mapa espeleotopográfico

A partir desses produtos cartográficos, os atributos espeleométricos são estimados por métodos indiretos, sendo o volume geralmente calculado pela multiplicação da área da planta pela média das alturas obtidas a partir das seções e perfis definidos pelo topógrafo (Fórmula 1 e Fórmula 2). Contudo, diretrizes e orientações

técnicas em elaboração no âmbito do CECAV recomenda que o volume total de uma caverna seja obtido pela soma dos volumes de cada ambiente morfológico distintos calculados individualmente. Esse procedimento pressupõe que a distribuição das seções represente adequadamente a variação morfológica da cavidade, o que nem sempre é possível, sobretudo em ambientes de geometria complexa (CECAV, 2025).

$$V = S \frac{(\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \dots + \Delta h_n)}{n}$$

Fórmula 01: Cálculo do volume de cada seção

$$V_{total} = \sum_{i=1}^n \left( S_i \frac{(\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \dots + \Delta h_n)}{n_i} \right)$$

Fórmula 02: Cálculo do volume da caverna.

Onde:  $V_{total}$  = volume total,  $S_i$  = área da planta para a seção  $i$ ,  $\Delta h_i$  = altura média da seção  $i$ ,  
 $n_i$  = número de seções para cada  $i$

Diversos fatores podem comprometer a precisão da topografia convencional, incluindo limitações de acesso e progressão, interferência magnética em determinados contextos geológicos, restrições ao uso de instrumentos de maior precisão e a própria subjetividade envolvida na escolha da quantidade e da localização das seções. Como consequência, erros aleatórios podem ser incorporados ao cálculo do volume, dificultando a reprodutibilidade e a comparabilidade dos resultados obtidos por diferentes equipes.

A literatura internacional consolidou, ao longo das últimas décadas, sistemas formais de avaliação da qualidade dos levantamentos espeleotopográficos, com destaque para os padrões desenvolvidos pela *British Cave Research Association* (BCRA) e pela *Union Internationale de Spéléologie* (UIS). Esses sistemas estabelecem critérios de transparência e avaliação crítica do produto cartográfico, permitindo a comparação entre mapas produzidos por diferentes equipes e em distintos contextos (DAY, 2002; BCRA, 2002; HÄUSELMANN, 2011).

A graduação proposta pela BCRA é amplamente utilizada para expressar o nível de acurácia do levantamento e o detalhamento cartográfico do mapa produzido, sendo particularmente relevante em contextos regulatórios, por permitir explicitar limitações técnicas do produto apresentado e reduzir ambiguidades na interpretação dos atributos espeleométricos derivados.

### 2.3. Escaneamento tridimensional, processamento e potencial analítico

O levantamento com LiDAR, comumente referido como escaneamento a laser tridimensional, constitui uma tecnologia baseada na emissão de pulsos de laser e no registro do tempo de retorno desses pulsos após atingirem uma superfície, permitindo a reconstrução detalhada da geometria do ambiente escaneado na forma de nuvens de pontos de alta densidade (LIMA, 2025).

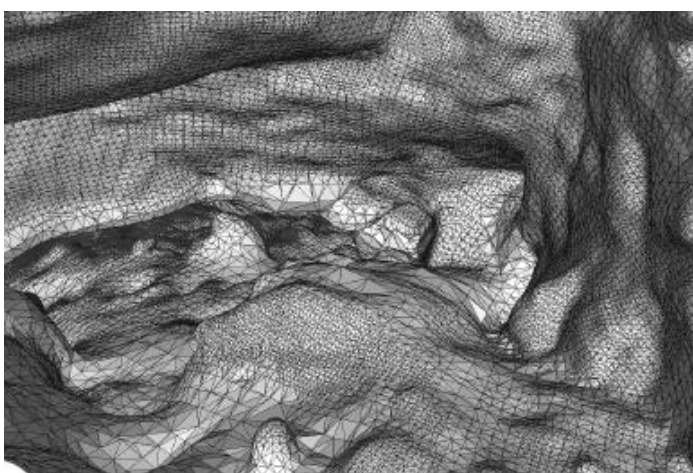


Figura 3 -Poisson surface reconstruction

No contexto do mapeamento de cavernas, o uso do LiDAR tem se consolidado como alternativa tecnicamente robusta, especialmente em cavidades hospedadas por rochas ferríferas e ferruginosas, onde a interferência magnética compromete a confiabilidade dos instrumentos tradicionais. Estudos recentes demonstram que o escaneamento a laser proporciona ganhos expressivos em acurácia morfológica, precisão cartográfica e eficiência operacional, reduzindo significativamente o tempo de campo e a exposição das equipes ao ambiente subterrâneo (LIMA, 2025).

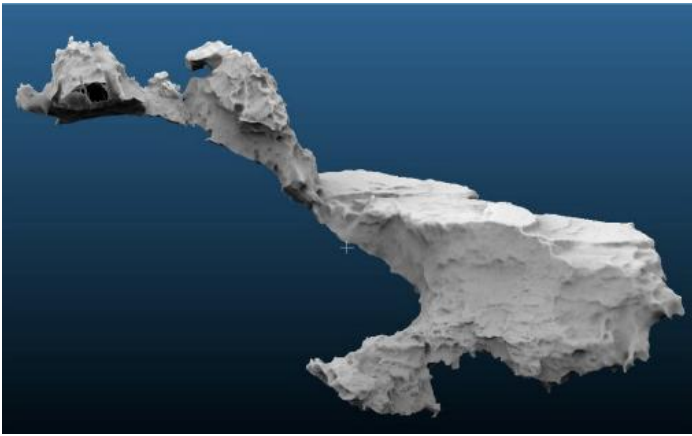


Figura 4 - Modelo 3D (mesh) final

A partir da nuvem de pontos, é possível gerar modelos tridimensionais fechados da cavidade, dos quais o volume pode ser extraído de forma direta e automatizada por meio de softwares específicos. Essa abordagem reduz a dependência de extrapolações baseadas em seções bidimensionais e tende a fornecer valores mais próximos da geometria real da cavidade, desde que observados critérios metodológicos compatíveis com aqueles adotados na topografia tradicional, como o fechamento do modelo na “base topográfica

zero” da cavidade.

Estudos recentes desenvolvidos no contexto acadêmico nacional reforçam a transição conceitual do mapeamento espeleológico bidimensional para abordagens baseadas em modelagem tridimensional como base primária de representação geométrica das cavidades. A tese de Simões (2025) propõe um arcabouço metodológico fundamentado na geração de modelos tridimensionais a partir de nuvens de pontos obtidas por diferentes técnicas, incluindo escaneamento a laser terrestre e fotogrametria de curta distância, destacando a superioridade dessas abordagens na representação contínua da geometria interna das cavernas quando comparadas às representações bidimensionais tradicionais.

Estudos internacionais sobre o uso de escaneamento a laser em cavernas indicam que a principal vantagem dos modelos tridimensionais não se limita ao cálculo de métricas como área ou volume, mas reside na documentação exaustiva da geometria subterrânea, passível de reutilização para múltiplas finalidades analíticas (COSSO; FERRANDO; ORLANDO, 2014).

Modelos baseados em nuvem de pontos permitem a geração posterior de plantas, perfis e seções em diferentes planos, análises geomorfológicas e a verificação independente de métricas extraídas, ampliando a rastreabilidade dos resultados. Essa característica é particularmente relevante no licenciamento ambiental, pois possibilita auditorias técnicas futuras sem a necessidade de novo levantamento de campo.

A confiabilidade dos produtos derivados de escaneamento tridimensional depende fortemente do fluxo de processamento da nuvem de pontos, incluindo as etapas de registro, filtragem, modelagem, geração de malha e definição de sólidos fechados. Diferenças nesses procedimentos podem gerar variações significativas nos valores das métricas extraídas, mesmo quando os dados de campo são equivalentes (COSSO; FERRANDO; ORLANDO, 2014).

Nesse sentido, a literatura recomenda a adoção de fluxos de processamento claramente documentados, com explicitação dos softwares, versões e parâmetros utilizados, de modo a permitir a reprodutibilidade e a auditabilidade dos resultados, especialmente quando estes subsidiam decisões administrativas e regulatórias.

#### **2.4. Evidências comparativas, integração metodológica e implicações regulatórias**

A comparação entre volumes obtidos por topografia convencional e por escaneamento a laser 3D tem sido objeto de estudos específicos no contexto do licenciamento ambiental, cujos resultados indicaram que o erro no cálculo do volume convencional não apresenta correlação linear direta com atributos como projeção horizontal ou área, sendo fortemente influenciado pela quantidade e pela distribuição das seções utilizadas no levantamento espeleotopográfico.

Experiências adicionais, como o mapeamento da Caverna do Manso com uso de sensor LiDAR, evidenciaram diferenças percentuais relevantes entre os valores de área e volume obtidos pelos dois métodos, com implicações diretas para a classificação de relevância espeleológica (LIMA, 2025). Esses resultados corroboram a percepção de que a escolha do método de levantamento pode influenciar de forma significativa os desfechos dos processos de licenciamento.

As referências bibliográficas analisadas indicam que a comparação entre atributos espeleométricos obtidos por métodos tradicionais e por escaneamento tridimensional exige a observância de princípios conceituais equivalentes, como a definição consistente dos limites da cavidade, o fechamento do modelo tridimensional no ponto zero e a coerência entre os recortes espaciais adotados (LIMA, 2025).

A tese de Simões (2025) evidencia que, independentemente da tecnologia empregada para a aquisição da nuvem de pontos, a adoção de modelos tridimensionais como base do levantamento espeleométrico permite maior coerência geométrica na extração de atributos como área e volume, desde que observados critérios conceituais equivalentes de recorte espacial, fechamento do modelo e definição do ponto de referência. Essas constatações reforçam a necessidade de integração metodológica e de padronização conceitual para fins de comparação e uso regulatório dos atributos espeleométricos (SIMÕES, 2025).

A ausência dessa equivalência metodológica pode gerar diferenças artificiais entre os valores obtidos, comprometendo interpretações comparativas e decisões baseadas nesses dados. A incorporação de novas tecnologias ao rito do licenciamento ambiental demanda, portanto, não apenas avanços técnicos, mas também clareza normativa e padronização metodológica, de forma a garantir segurança jurídica e previsibilidade decisória.

<b>Método</b>	<b>Tema</b>	<b>Recomendação metodológica</b>	<b>Finalidade</b>
Topografia Convencional	Controle geométrico do levantamento convencional	Executar poligonais com fechamento e, quando necessário, ajuste distribuído dos erros	Aumentar a precisão e a confiabilidade do levantamento
	Definição da base topográfica	Definir e documentar de forma consistente a base topográfica zero da cavidade	Padronizar o início do levantamento e evitar vieses nos cálculos
	Distribuição de seções	Planejar a quantidade e a localização das seções de forma compatível com a complexidade geométrica da cavidade	Reduzir erros aleatórios na estimativa do volume
	Uso do volume convencional	Aplicar rigorosamente os graus de precisão dos levantamentos espeleotopográficos (BCRA/UIS)	Assegurar base técnica confiável para a definição do grau de relevância espeleológica
Scanner Laser	Comparação entre métodos	Garantir equivalência conceitual entre os métodos (fechamento do modelo, limites da cavidade)	Assegurar comparabilidade entre resultados
	Documentação de metadados	Registrar equipamentos, métodos, parâmetros de campo e de processamento	Permitir rastreabilidade e auditoria técnica
	Processamento de nuvem de pontos	Documentar o fluxo de processamento (registro, filtragem, modelagem e extração de métricas)	Garantir reprodutibilidade dos resultados
	Uso regulatório do escaneamento 3D	Priorizar o escaneamento tridimensional quando a decisão depender do volume	Aumentar a confiabilidade dos atributos espeleométricos
	Transparência metodológica	Declarar limitações, incertezas e grau de qualidade do levantamento	Dar suporte à segurança jurídica do licenciamento

Tabela 3 – Recomendações metodológicas para levantamento e cálculo de atributos espeleométricos (topografia convencional e TLS/LiDAR)

### 3. Limitações e desafios metodológicos no levantamento de atributos espeleométricos

O levantamento de atributos espeleométricos utilizados como subsídio à classificação de relevância no licenciamento ambiental envolve desafios metodológicos que decorrem tanto da complexidade morfológica das cavidades naturais subterrâneas quanto das limitações inerentes aos métodos de mapeamento disponíveis. A literatura técnica reconhece que diferenças observadas nos valores de atributos como área e volume podem decorrer das escolhas metodológicas, dos pressupostos conceituais e do nível de representação adotado em cada levantamento, conforme discutido nos estudos clássicos da espeleotopografia de Chabert e Watson (1981). No contexto institucional, essas limitações e condicionantes vêm sendo discutidas e sistematizadas em diretrizes técnicas atualmente em elaboração no âmbito do CECAV (CECAV, 2025).

Nesse contexto, a explicitação das limitações e dos desafios metodológicos associados aos diferentes métodos constitui etapa essencial para a adequada interpretação dos resultados apresentados no item seguinte, permitindo que as análises comparativas sejam compreendidas à luz das incertezas e condicionantes que influenciam a obtenção dos atributos espeleométricos.

#### 3.1. Limitações e desafios metodológicos da topografia espeleológica convencional e do escaneamento tridimensional

A topografia espeleológica convencional baseia-se na aquisição de medições lineares, angulares e de inclinação, associadas à elaboração de plantas, perfis e seções que representam, de forma simplificada, a geometria interna das cavidades. Trata-se de um método historicamente consolidado e amplamente difundido, cuja robustez operacional e baixo custo explicam sua permanência como principal técnica empregada em levantamentos espeleológicos no Brasil. No entanto, quando aplicada à obtenção de atributos tridimensionais, especialmente o volume, a topografia convencional apresenta limitações metodológicas relevantes.

No que se refere ao volume da caverna, uma das principais limitações desse método reside na forte dependência da quantidade, da localização e da distribuição das seções transversais ao longo da cavidade. Em ambientes de geometria simples, essa representação bidimensional pode fornecer aproximações satisfatórias. Contudo, em cavidades com salões amplos, condutos irregulares ou elevada variabilidade morfológica, a simplificação inerente ao método tende a subamostrar a geometria real, incorporando erros de natureza predominantemente aleatória ao cálculo do volume.

Conforme detalhado no Item 2.2, o volume total de uma cavidade natural subterrânea deve ser obtido a partir da soma dos volumes calculados individualmente para cada ambiente morfológico distinto. Essa abordagem metodológica pressupõe que a caverna seja compartimentada em trechos relativamente homogêneos do ponto de vista morfológico e que esses ambientes sejam adequadamente representados ao longo de toda a cavidade por meio da implantação e distribuição criteriosa de seções verticais, condição fundamental para reduzir a subamostragem da morfologia interna e a variabilidade aleatória associada ao cálculo do volume.

Mudanças significativas de morfologia ao longo da cavidade devem ser acompanhadas da implantação de bases topográficas e da execução de seções verticais adicionais, com o objetivo de representar de forma mais fidedigna as transições morfológicas entre ambientes distintos. A adoção sistemática desse procedimento contribui para reduzir a variabilidade aleatória do volume estimado e aumentar a precisão do cálculo, ao incorporar de maneira mais adequada a complexidade tridimensional da cavidade.

Além disso, a topografia convencional é sensível a condicionantes operacionais e ambientais, como restrições de acesso e de progressão, interferência magnética, especialmente relevante em cavernas hospedadas em rochas ferríferas, limitações no uso de instrumentos de maior precisão e subjetividade associada às decisões

de campo tomadas pelo topógrafo. Esses fatores afetam diretamente a reprodutibilidade e a comparabilidade dos resultados, dificultando a comparação entre levantamentos realizados por equipes distintas ou em momentos diferentes.

O escaneamento tridimensional por meio de scanners laser representa um avanço significativo na documentação geométrica de cavernas, ao permitir a aquisição direta e contínua da geometria interna por meio de nuvens de pontos de alta densidade, reduzindo a dependência de representações bidimensionais e ampliando o potencial analítico dos dados obtidos (CANAVESE *et al.*, 2011). Entretanto, apesar dessas vantagens, o método também apresenta desafios metodológicos e operacionais relacionados às etapas de aquisição, processamento e modelagem dos dados, os quais exigem avaliação crítica, sobretudo quando considerado para aplicações em contextos regulatórios e de uso sistemático (COSSO; FERRANDO; ORLANDO, 2014).

Um aspecto central diz respeito à dependência de decisões de processamento, que incluem o registro das nuvens de pontos, a filtragem de ruídos, a geração de malhas, a definição de superfícies e o fechamento de sólidos tridimensionais. As diferenças nesses procedimentos, muitas vezes associadas ao *software* utilizado, aos parâmetros adotados ou à experiência do operador, podem resultar em variações nos valores finais dos atributos extraídos, mesmo quando os dados de campo são semelhantes.

Adicionalmente, fatores operacionais como custo dos equipamentos, tanto para aquisição da nuvem de pontos quanto para seu processamento, logística de transporte, sensibilidade dos sensores à presença de água e limitações de aplicação em ambientes extensos ou com restrições de acesso influenciam a viabilidade do escaneamento tridimensional em levantamentos sistemáticos no âmbito do licenciamento ambiental. Esses condicionantes reforçam a necessidade de avaliação criteriosa da aplicabilidade do método em cada contexto específico.

Além desses condicionantes operacionais e técnicos, um fator adicional que impacta de forma decisiva a viabilidade do escaneamento tridimensional em larga escala no licenciamento ambiental está relacionado ao próprio modelo comparativo adotado para a definição da relevância dos atributos espeleométricos. Conforme os atos infralegais que regulamentam a legislação vigente, a classificação de atributos dimensionais é realizada a partir da comparação entre todas as cavidades naturais subterrâneas que integram uma mesma amostra, seja em enfoque local ou regional. Em determinadas províncias espeleológicas, como a Serra dos Carajás e o Quadrilátero Ferrífero, as amostras regionais podem envolver centenas ou até milhares de cavernas. Nesse contexto, torna-se metodologicamente imprescindível que todos os atributos comparados sejam obtidos a partir de um mesmo método de levantamento, de modo a garantir coerência, comparabilidade e isonomia entre os dados analisados. A adoção do escaneamento tridimensional como método padrão implicaria, portanto, a necessidade de realizar levantamentos tridimensionais em toda a amostra local e regional, o que eleva substancialmente os custos financeiros, logísticos e operacionais dos estudos espeleológicos.

Esse requisito de uniformidade metodológica torna o uso do escaneamento tridimensional pouco viável para aplicação sistemática em processos de licenciamento ambiental de grande escala, nos quais a abrangência espacial e o volume de cavidades a serem caracterizadas são elevados. Mesmo reconhecendo sua maior consistência geométrica, a exigência de adoção do método comprometeria a abrangência dos levantamentos e a própria viabilidade econômica dos estudos.

Adicionalmente, embora o escaneamento tridimensional permita a extração direta de atributos como área e volume a partir de modelos tridimensionais, esse método não produz, no pós-processamento, a planta baixa topográfica da cavidade nem o cálculo da projeção horizontal nos moldes exigidos pelos procedimentos técnicos e normativos vigentes. Esses produtos continuam sendo fundamentais tanto para a análise

espeleométrica quanto para a instrução dos processos de licenciamento ambiental, o que mantém a necessidade da realização de levantamentos por topografia espeleológica convencional.

Como consequência, a adoção combinada dos dois métodos, topografia convencional e escaneamento tridimensional, implicaria a duplicação dos esforços de campo e gabinete, com a execução de dois levantamentos distintos para a mesma cavidade. Essa sobreposição metodológica resulta em aumento expressivo dos custos dos estudos espeleológicos, sem que haja, necessariamente, proporcional ganho de eficiência compatível com as demandas de aplicação em larga escala no licenciamento ambiental.

Além dos desafios relacionados ao processamento e à logística operacional, destaca-se as limitações práticas associadas à instalação e ao manuseio dos equipamentos de escaneamento tridimensional em ambientes subterrâneos de difícil acesso, como trechos com restrições de progressão, condutos estreitos, desníveis acentuados e elevada umidade. Nessas condições, a mobilidade do equipamento pode ser significativamente reduzida, afetando o posicionamento dos sensores e, conseqüentemente, a cobertura espacial da nuvem de pontos obtida.

Outro aspecto relevante refere-se à perda ou degradação de informações em superfícies com presença de água, seja em forma de lâminas d'água, poças, cursos ativos ou superfícies altamente refletivas, que podem absorver ou dispersar os pulsos do laser, gerando áreas de sombra ou lacunas na nuvem de pontos. Essas limitações exigem cautela na interpretação dos modelos tridimensionais e, em alguns casos, a complementação do levantamento com métodos tradicionais, de modo a assegurar a representação adequada da geometria da cavidade.

A tese de Simões (2025) reforça essas limitações ao demonstrar que ambientes subterrâneos com geometrias complexas, elevada umidade e presença de água tendem a gerar descontinuidades na nuvem de pontos, exigindo estratégias de aquisição complementares e decisões criteriosas durante o processamento dos dados, sob pena de comprometer a continuidade geométrica dos modelos tridimensionais e a confiabilidade dos atributos espeleométricos extraídos.

Simões (2025) destaca ainda que a experiência técnica do operador exerce influência significativa sobre a qualidade final dos produtos tridimensionais, tanto na definição das estratégias de aquisição quanto na parametrização dos processos de registro e fechamento dos modelos. Essa constatação desloca o foco das incertezas do momento da medição para as etapas de processamento e interpretação dos dados, corroborando empiricamente as recomendações técnicas do CECAV.

Por fim, a aplicação do escaneamento tridimensional demanda profissionais especializados e devidamente capacitados, tanto para a operação dos equipamentos em campo quanto para o processamento e a interpretação dos dados coletados. A ausência de formação técnica adequada pode comprometer a qualidade dos produtos gerados, introduzindo incertezas associadas a decisões de aquisição, registro e modelagem que não são facilmente perceptíveis na análise final dos resultados.

### **3.2. Equivalência conceitual, incertezas e implicações na interpretação dos resultados**

A comparação entre atributos espeleométricos obtidos por topografia convencional e por escaneamento tridimensional exige a observância de princípios conceituais equivalentes, sob pena de gerar diferenças artificiais nos resultados. Aspectos como a definição consistente dos limites da cavidade, o fechamento adequado do modelo tridimensional no ponto zero e a coerência entre os recortes espaciais adotados são fundamentais para assegurar comparabilidade metodológica entre os métodos.

A ausência dessa equivalência pode levar a interpretações equivocadas, atribuindo às metodologias diferenças que, na realidade, decorrem de escolhas operacionais ou conceituais distintas. Nesse sentido, a

literatura enfatiza a importância da documentação detalhada dos procedimentos de campo e de processamento, bem como da explicitação das incertezas associadas aos atributos obtidos, especialmente quando estes subsidiam decisões administrativas e jurídicas no âmbito do licenciamento ambiental.

As limitações e os desafios metodológicos aqui discutidos têm implicações diretas na leitura dos resultados apresentados no item seguinte. Variações observadas nos valores de área e volume podem refletir não apenas diferenças reais na geometria das cavidades, mas também efeitos de escala, resolução, distribuição amostral e decisões metodológicas. O reconhecimento explícito dessas condicionantes é, portanto, fundamental para uma análise integrada e tecnicamente consistente dos resultados comparativos, evitando interpretações simplistas e fortalecendo a base técnica para proposições metodológicas e normativas futuras.

Método	Limitação ou desafio metodológico	Implicação prática
Topografia convencional	Dependência da quantidade e distribuição de seções	Introdução de erro aleatório no cálculo do volume
	Interferência magnética	Comprometimento da precisão angular
	Subjetividade nas decisões de campo	Baixa reprodutibilidade entre equipes
Scanner tridimensional	Dificuldade de instalação e manuseio	Cobertura parcial da cavidade em ambientes restritos
	Presença de água e superfícies refletivas	Lacunas e sombras na nuvem de pontos
	Dependência de decisões de processamento	Variação nos atributos espeleométricos extraídos
	Necessidade de profissionais especializados	Risco de vieses técnicos na aquisição e interpretação

Tabela 4 – Síntese das principais limitações metodológicas no levantamento de atributos espeleométricos

#### 4. Análise integrada dos resultados comparativos

##### 4.1. Base de dados analisada e procedimentos adotados

A análise integrada dos resultados comparativos foi realizada a partir de uma base de dados composta por levantamentos espeleotopográficos executados por métodos convencionais e por técnicas de escaneamento tridimensional, incluindo o escaneamento a laser e o cálculo de volume a partir de modelos tridimensionais processados em ambiente computacional utilizando o *software Cloud Compare*. Essa base incorpora tanto os dados utilizados no estudo de referência conduzido por Calux *et al.* (2017) quanto novos levantamentos, ampliando o número de cavidades analisadas e a diversidade de contextos geomorfológicos.

A amostra analisada é composta por 93 cavernas localizadas na Província Espeleológica da Serra dos Carajás, inseridas na Floresta Nacional de Carajás, no sudeste do estado do Pará, desenvolvidas predominantemente em litologias ferríferas, cujos atributos espeleométricos estão detalhados no Anexo I.

Todas as cavidades incluídas na análise foram objeto de levantamentos espeleotopográficos realizados por topografia convencional e por escaneamento tridimensional, permitindo a comparação direta e sistemática entre os atributos espeleométricos obtidos por ambos os métodos.

Os parâmetros analisados incluem projeção horizontal, desnível, quantidade total de seções topográficas, área da cavidade, área média por seção, volume calculado a partir da topografia convencional, volume derivado de modelos tridimensionais, variação percentual entre os volumes e o erro padronizado do volume. A amostra contempla cavidades com elevada variabilidade geométrica, refletindo tanto a diversidade morfológica típica das cavernas ferríferas da Serra dos Carajás quanto diferenças associadas às estratégias de levantamento e à densidade de seccionamento adotadas em campo. A Tabela 5 traz os dados estatísticos descritivos dos parâmetros espeleométricos da amostra.

Atributo	PH* (m)	Desnível (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Qtd. Seções	Volc (m <sup>3</sup> )	Vols (m <sup>3</sup> )	Erro [(Volc/Vols)-1]
N	93	93	93	93	93	93	93
Média	42.26	4.34	159.30	3.24	323.22	288.02	0.50
Mediana	21.00	3.00	60.00	2.00	88.00	68.07	0.18
Moda	14.00	1.00	41.00	2.00	37.00	0.00	0.06
Frequência da Moda	3.00	3.00	2.00	54.00	2.00	0.00	0.00
Mínimo	3.00	0.00	9.00	1.00	5.00	2.13	-0.92
Máximo	233.00	33.00	1198.00	15.00	2995.00	2501.64	6.83
P:25	11.78	1.655	30.00	2.00	32.42	25.055	-0.02
P:75	55.975	5.55	149.89	3.50	249.25	182.95	0.56
Desvio Padrão	49.44	4.78	230.42	2.59	566.62	508.12	1.19
Variância	2443.99	22.85	53091.09	6.70	321055.05	258184.82	1.41
Desvio médio	35.02	3.16	162.49	1.69	381.49	350.20	0.68
Amplitude	230.00	33.00	1189.00	14.00	2990.00	2500.00	8.00
Assimetria	2.24	3.08	2.26	2.65	2.58	2.53	3.35
Curtose	3.12	2.65	2.64	7.09	4.67	3.75	5.46

Tabela 5 - Estatística descritiva dos parâmetros espeleométricos

Foram realizadas análises estatísticas descritivas dos valores de variação percentual entre os volumes obtidos pelos diferentes métodos, bem como análises gráficas por meio de diagramas de dispersão e *boxplots*. Ressalta-se que o objetivo desta etapa não foi avaliar a exatidão absoluta de cada método, mas examinar o comportamento relativo das diferenças observadas entre os volumes calculados por topografia convencional e por escaneamento tridimensional, bem como investigar possíveis relações entre essas diferenças e atributos geométricos das cavidades analisadas. Esse enfoque permite uma leitura integrada dos resultados, alinhada às discussões metodológicas desenvolvidas nos itens anteriores.

#### 4.2. Comparação entre volumes obtidos por topografia convencional e escaneamento tridimensional

A comparação entre os volumes obtidos por topografia convencional e aqueles derivados de escaneamento tridimensional constitui o eixo central da análise desenvolvida neste estudo. A variação percentual entre os volumes calculados pelos dois métodos foi utilizada como métrica principal para avaliar o comportamento do erro associado à representação volumétrica baseada em plantas, perfis e seções, tendo como premissa que os modelos tridimensionais são a melhor aproximação disponível da geometria real das cavidades.

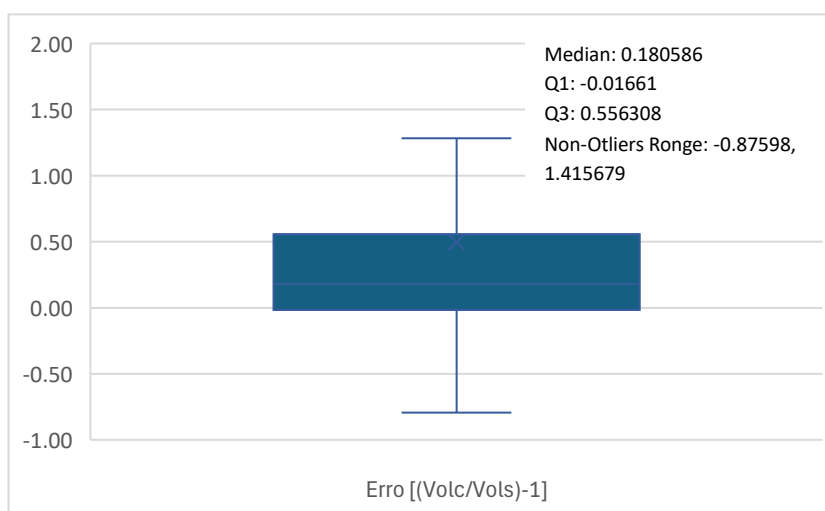


Gráfico 1 – Distribuição do erro padronizado do volume (Volc/Vols)-1 obtido a partir da comparação entre topografia convencional e escaneamento tridimensional. O *boxplot* representa a mediana, os quartis (25%–75%) e o intervalo não outlier, conforme o critério estatístico de 1,5 vezes o intervalo interquartil (IQR), os valores extremos ocultados apenas para fins de visualização.

Os resultados obtidos indicam que a variação percentual do volume apresenta ampla dispersão, com valores distribuídos em torno de zero e presença de outliers tanto positivos quanto negativos (Gráfico 1). A análise gráfica evidencia uma mediana próxima de zero, associada a uma distribuição assimétrica, característica que evidencia a presença de erros de natureza predominantemente aleatória.

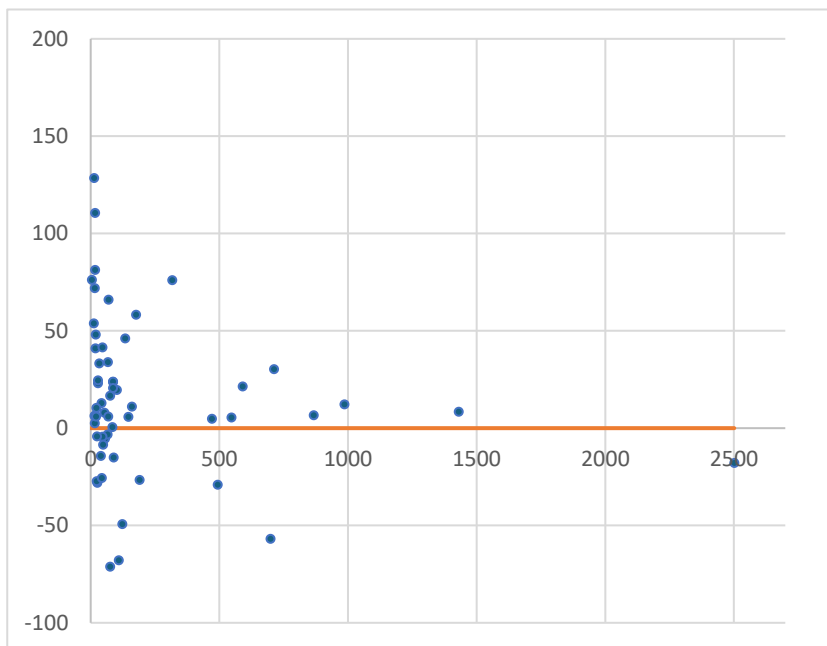


Gráfico 2 – Variação percentual do volume convencional em relação ao volume obtido por escaneamento tridimensional

A comparação visual entre os volumes obtidos pelos dois métodos, expressa na forma de diagramas de dispersão, não revela tendência sistemática de superestimação ou subestimação do volume convencional em relação ao volume tridimensional. Observa-se que, para um conjunto significativo de cavidades, as diferenças percentuais assumem valores positivos e negativos de magnitude variável, sem concentração em faixas específicas de tamanho ou complexidade geométrica.

A ausência de um padrão sistemático reforça a interpretação de que o erro associado ao cálculo do volume por topografia convencional não apresenta

comportamento previsível ou facilmente parametrizável. Essa constatação fornece a base empírica para as análises desenvolvidas nos subitens seguintes, nas quais se investiga a relação entre a variação volumétrica e atributos geométricos específicos das cavidades analisadas.

### 4.3. Relação entre a variação volumétrica e atributos geométricos da cavidade

A análise da relação entre a variação percentual do volume e os atributos geométricos das cavidades foi conduzida com o objetivo de verificar a existência de correlações sistemáticas que pudessem explicar o comportamento das diferenças observadas entre os métodos de levantamento. Para esse fim, foram avaliadas as relações entre a variação volumétrica e parâmetros como projeção horizontal, área da cavidade, número de seções topográficas e área média por seção, conforme apresentado nos gráficos 3 a 6.

Os diagramas de dispersão não evidenciam correlação linear significativa entre a variação percentual do volume e a projeção horizontal ou a área total da cavidade. Cavidades com dimensões semelhantes apresentam comportamentos distintos quanto à diferença entre os volumes calculados pelos dois métodos, indicando que o porte da cavidade, por si só, não constitui um fator determinante do erro volumétrico associado à topografia convencional.

Da mesma forma, a análise da relação entre a variação percentual do volume e a área média por seção não revela um padrão linear consistente que permita prever o comportamento do erro volumétrico a partir desse atributo isoladamente. Observa-se, contudo, uma dispersão mais acentuada dos valores de variação em cavidades com seções mais espaçadas, o que sugere maior sensibilidade do cálculo do volume convencional à subamostragem da geometria interna.

Esses resultados corroboram a interpretação de que o erro volumétrico associado à topografia convencional possui caráter predominantemente aleatório e está fortemente condicionado à forma como a geometria interna da cavidade é amostrada localmente. Tal comportamento é compatível com as limitações

metodológicas discutidas no Item 3, especialmente no que se refere à dependência da distribuição das seções e à simplificação geométrica inerente às representações bidimensionais.

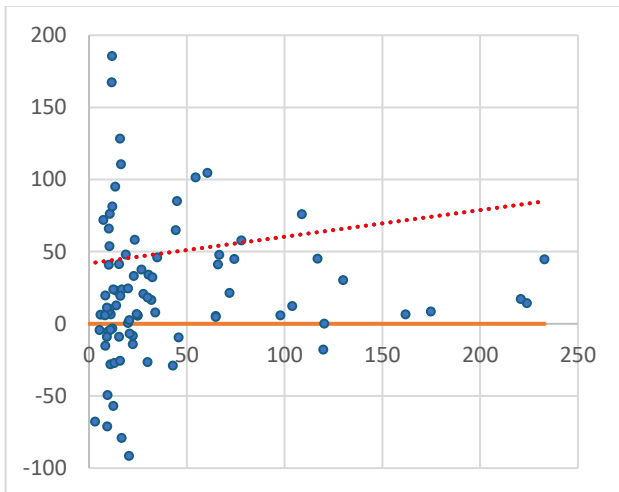


Gráfico 3 – Projeção horizontal em função da variação percentual do volume

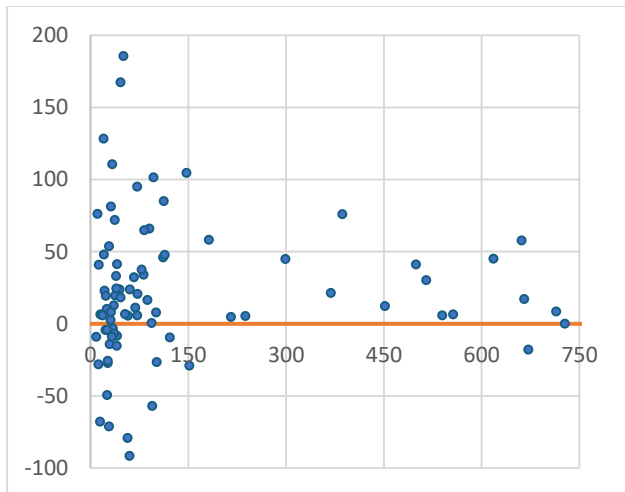


Gráfico 4 – Área da cavidade em função da variação percentual do volume

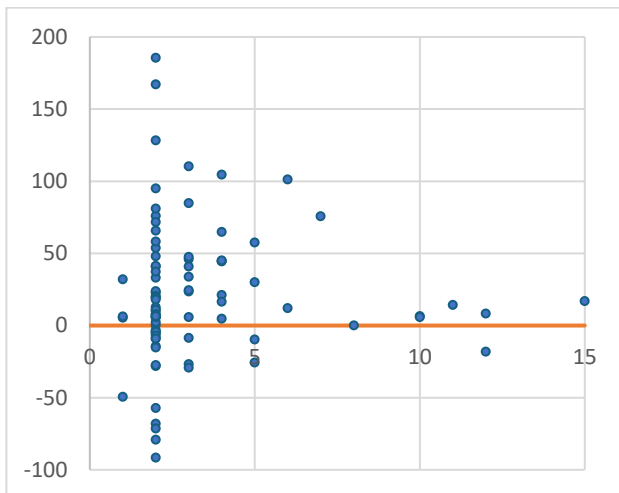


Gráfico 5 – Número de seções topográficas em função da variação percentual do volume

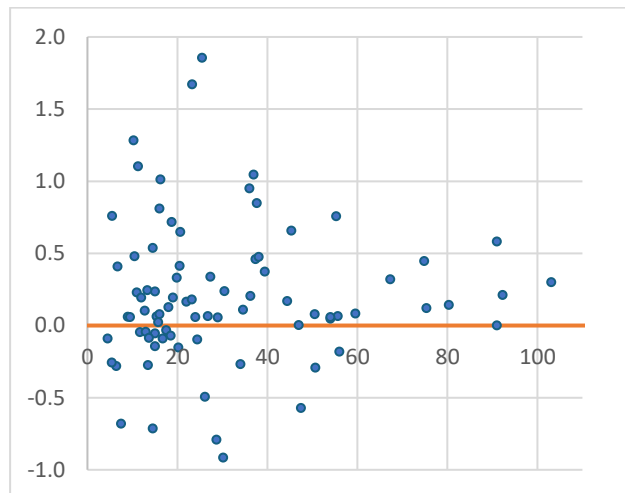


Gráfico 6 – Área média das seções topográficas em função da variação percentual do volume

A ausência de correlação entre a variação percentual do volume e demais atributos espeleométricos como projeção horizontal e área da cavidade é, portanto, um resultado compatível com o comportamento esperado das cavidades naturais subterrâneas. Conforme explicitado na Nota Técnica da Sociedade Brasileira de Geologia (SBG) sobre o significado das dimensões notáveis na avaliação da relevância espeleológica, não existe uma relação direta ou causal entre os atributos de projeção horizontal, área e volume, de modo que uma cavidade com grande desenvolvimento em planta pode apresentar área ou volume reduzidos, assim como cavidades de grande volume não necessariamente exibem grande projeção horizontal ou área expressiva (PEREIRA *et al.*, 2025).

Essa dissociação decorre das especificidades geomorfológicas e espeleogenéticas de cada cavidade, que condicionam de forma independente o desenvolvimento linear, a ocupação espacial e a volumetria dos vazios subterrâneos. Nesse contexto, a inexistência de correlação entre esses atributos reforça a interpretação de que o erro volumétrico associado à topografia convencional não pode ser explicado por métricas geométricas isoladas, mas resulta, predominantemente, da forma como a geometria tridimensional da cavidade é amostrada e representada no processo de levantamento.

Resultados obtidos nesse estudo reforçam essa interpretação. Em avaliação comparativa entre volumes calculados por topografia convencional e por escaneamento tridimensional, verificou-se que, em 76,6% da amostra, o volume obtido por topografia convencional foi superior ao volume calculado a partir de varredura a laser, enquanto em 23,4% dos casos o volume derivado do escaneamento tridimensional apresentou valores superiores. Tal padrão reforça que as diferenças observadas não se explicam pelo porte da cavidade, mas pelo modo como sua geometria interna é amostrada e integrada matematicamente, reforçando o caráter predominantemente aleatório do erro volumétrico associado ao método.

#### 4.4. Influência da densidade de seccionamento na estimativa volumétrica

Embora não tenha sido identificada correlação linear direta entre a variação volumétrica e os atributos espeleométricos das cavidades, a análise dos dados indica que a densidade de seccionamento exerce influência relevante sobre a magnitude e, sobretudo, sobre a dispersão do erro volumétrico associado à topografia convencional.

Em cavidades com número reduzido de seções, observa-se elevada variabilidade nos valores de variação percentual do volume, com ocorrência de erros positivos e negativos de grande magnitude, refletindo a dificuldade de representar adequadamente geometrias morfológicamente complexas a partir de um conjunto limitado de perfis transversais. A análise por classes de densidade de seccionamento evidencia que cavidades com baixa densidade apresentam distribuições mais amplas e instáveis do erro volumétrico (Gráfico 7).

À medida que a densidade de seccionamento aumenta, verifica-se, de forma geral, uma redução da dispersão dos valores de variação percentual do volume, ainda que sem eliminação completa das diferenças entre os métodos e com ocorrência pontual de valores extremos. Esse comportamento indica que o aumento do número de seções contribui para maior estabilidade e previsibilidade das estimativas volumétricas obtidas por topografia convencional, embora não assegure convergência plena com os volumes derivados de modelos tridimensionais.

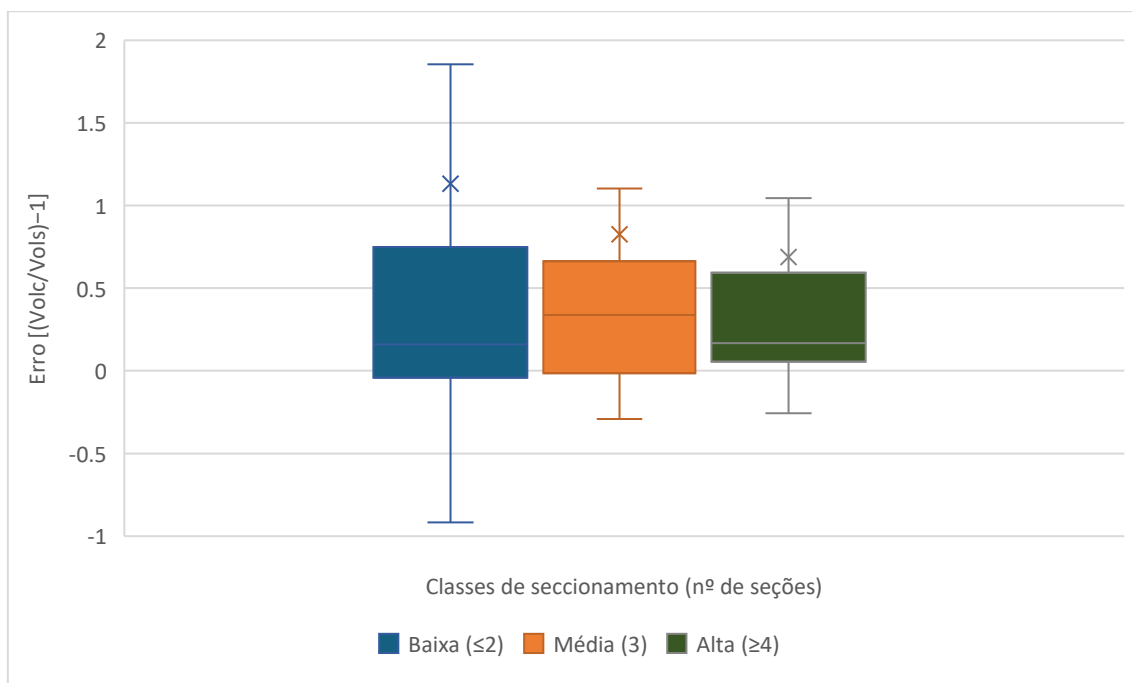


Gráfico 7 - Erro volumétrico por classes de densidade de seções

Do ponto de vista prático, o incremento da densidade de seccionamento implica em aumento do tempo de campo, do esforço operacional e dos custos associados ao levantamento espeleotopográfico. Essas limitações restringem, mas não inviabilizam, estratégias baseadas no aumento do número de seções como medida de mitigação das incertezas associadas ao cálculo do volume convencional, reforçando a necessidade de critérios metodológicos claros e proporcionais às características morfológicas das cavidades analisadas.

Nesse contexto, os resultados demonstram que a topografia convencional apresenta limitações estruturais para a estimativa volumétrica. Contudo, quando executada com maior densidade de seccionamento e rigor técnico, tornam-se mais viáveis para uso no licenciamento ambiental em contraponto com métodos tridimensionais que se demonstram uma alternativa robusta para a obtenção de atributos espeleométricos, em especial, em contextos que demandam maior precisão e previsibilidade. Essa constatação fornece subsídios técnicos relevantes para as discussões referentes à integração metodológica e às implicações regulatórias do uso desses atributos no licenciamento ambiental.

#### **4.5. Síntese interpretativa dos resultados**

A análise integrada dos resultados confirma que as diferenças observadas entre os volumes calculados por topografia convencional e por métodos tridimensionais não apresentam comportamento sistemático nem relação direta com atributos geométricos globais das cavidades. Os resultados indicam que o erro volumétrico associado à topografia convencional possui caráter predominantemente aleatório, fortemente condicionado à forma como a geometria interna é amostrada e representada.

A ausência de correlação linear significativa entre a variação percentual do volume e parâmetros como projeção horizontal e área reforça que a incerteza volumétrica não pode ser prevista ou corrigida a partir desses atributos isoladamente. Ainda que o aumento da densidade de seções contribua para a redução da dispersão dos resultados.

Por outro lado, os métodos tridimensionais demonstram estabilidade e coerência geométrica na estimativa dos atributos espeleométricos de área e volume, embora também estejam sujeitos a condicionantes relacionados à aquisição e ao processamento dos dados, fatos que reverberam diretamente no seu alto custo. Assim, os resultados evidenciam que a adoção de técnicas tridimensionais representa um avanço metodológico para o levantamento de atributos espeleométricos, desde que acompanhada de critérios claros de padronização, rastreabilidade metodológica e capacitação técnica das equipes envolvidas, conforme discutido nos itens anteriores.

Esse conjunto de evidências fornece base empírica consistente para as discussões acerca dos métodos convencionais e tridimensionais para o levantamento de dados e cálculos volumétricos de cavernas às implicações no licenciamento ambiental.

### **5. Integração de abordagens estatísticas como subsídio à definição de atributos espeleométricos**

As análises desenvolvidas até o Item 4 permitiram atender de forma satisfatória aos objetivos inicialmente propostos para este projeto, quais sejam: (i) avaliar criticamente a precisão dos métodos tradicionais de cálculo volumétrico empregados na topografia espeleológica; (ii) comparar tais métodos com abordagens baseadas em modelos tridimensionais obtidos por escaneamento; e (iii) ampliar a base empírica de dados espeleométricos disponível para análise técnica e científica.

Os resultados obtidos evidenciaram limitações estruturais dos métodos convencionais, especialmente no que se refere à representação da geometria interna das cavidades e à variabilidade do erro volumétrico associada à densidade e à distribuição das seções topográficas. Ao mesmo tempo, demonstraram que tais limitações não decorrem exclusivamente do porte ou dos atributos dimensionais das cavidades, mas sobretudo da forma como sua geometria é amostrada e simplificada nos levantamentos bidimensionais.

Nesse contexto, e considerando que os objetivos iniciais foram plenamente alcançados, o projeto passa a adotar, nesta nova etapa, uma abordagem orientada à aplicação dos resultados obtidos no aprimoramento de critérios técnicos e metodológicos. O foco desloca-se, assim, da avaliação comparativa entre métodos para a construção de subsídios técnicos capazes de orientar a padronização, a confiabilidade e a consistência dos dados espeleométricos utilizados no licenciamento ambiental, em consonância com as demandas regulatórias vigentes.

A consolidação dessas constatações permitiu reconhecer que a etapa inicial do projeto cumpriu plenamente sua função diagnóstica, ao evidenciar, de forma empírica e estatisticamente fundamentada, as limitações inerentes aos métodos tradicionais e tridimensionais de cálculo volumétrico. A partir desse diagnóstico, tornou-se possível avançar para uma etapa de natureza propositiva, orientada não apenas à comparação entre métodos, mas à construção de critérios técnicos mais consistentes para a interpretação e o uso dos atributos espeleométricos no licenciamento ambiental.

Esse novo enfoque reflete a maturação do próprio projeto, que passa a utilizar o conjunto de evidências produzidas como base para a formulação de diretrizes metodológicas e estatísticas capazes de reduzir ambiguidades interpretativas, aumentar a comparabilidade entre estudos e conferir maior previsibilidade às análises técnicas realizadas no âmbito do licenciamento. Trata-se, portanto, de uma transição deliberada de uma abordagem essencialmente avaliativa para uma abordagem normativo-técnica, sem ruptura com os objetivos iniciais, mas como desdobramento natural dos resultados alcançados.

### **5.1 Métricas estatísticas para a classificação de atributos dimensionais de cavernas**

Nessa nova etapa, o projeto passa a incorporar os estudos desenvolvidos em parceria com o Departamento de Estatística da Universidade Federal de Minas Gerais, realizados por Mariana Rodrigues Fontenelle, sob coordenação do professor Marcos Oliveira Prates, cujo objetivo central foi definir e testar métricas estatísticas adequadas para a classificação dos atributos dimensionais de cavernas no contexto do licenciamento ambiental. Essa parceria teve como foco principal a construção de uma base metodológica estatisticamente robusta, capaz de lidar com as particularidades dos dados espeleométricos, notadamente sua assimetria, heterogeneidade e sensibilidade a valores extremos.

Nessa nova etapa, o projeto passa a incorporar os estudos desenvolvidos em parceria com o Departamento de Estatística da Universidade Federal de Minas Gerais, cujo objetivo central foi definir e testar métricas estatísticas adequadas para a classificação dos atributos dimensionais de cavernas no contexto do licenciamento ambiental. Essa parceria teve como foco principal a construção de uma base metodológica estatisticamente robusta, capaz de lidar com as particularidades dos dados espeleométricos, notadamente sua assimetria, heterogeneidade e sensibilidade a valores extremos.

Os trabalhos conduzidos no âmbito dessa cooperação partiram do reconhecimento de que os atributos dimensionais das cavernas não seguem distribuições normais e que métricas baseadas exclusivamente em médias ou valores centrais tendem a produzir classificações instáveis ou pouco representativas. Assim, foram exploradas abordagens estatísticas baseadas em medidas robustas de posição e dispersão, bem como em percentis elevados, com o objetivo de estabelecer critérios de classificação mais consistentes, replicáveis e tecnicamente defensáveis.

A incorporação dessa etapa ao projeto amplia seu escopo original, ao integrar de forma explícita o conhecimento estatístico especializado ao domínio técnico da espeleologia aplicada ao licenciamento ambiental. Essa integração permite que os resultados obtidos não se limitem à constatação de diferenças entre métodos de levantamento, mas avancem na proposição de critérios objetivos para a interpretação dos dados gerados por esses métodos, fortalecendo a base técnica para decisões regulatórias.

### **5.2. Síntese integrada dos estudos estatísticos e resultados aplicados**

Os estudos estatísticos desenvolvidos nesta nova etapa do projeto foram fundamentados em uma base de dados abrangente, fornecida pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio/CECAV). A base analisada é composta por sete bancos de dados distintos, cada um correspondente a uma unidade espeleológica em escala regional ou local, representando diferentes contextos geológicos, geomorfológicos e espaciais do território nacional.

As unidades espeleológicas regionais consideradas no estudo incluem Lagoa Santa (MG), Carste do Alto São Francisco (Arcos-Pains-Doresópolis, MG), Serra dos Carajás (CKS, PA), Quadrilátero Ferrífero (QDF, MG) e Espinhaço Meridional (EM, MG). As regiões de Edalina (GO) e Carandaí (MG), em função do número reduzido de cavernas inventariadas, foram tratadas como agrupamentos locais. Em cada uma dessas regiões, os dados estão organizados em conjuntos de cavernas que compartilham características comuns, como proximidade geográfica, formação geológica e contexto ecossistêmico, permitindo análises tanto em escala local quanto regional.

No caso das amostras regionais, os bancos de dados são compostos por diferentes agrupamentos locais. Em Lagoa Santa, por exemplo, incluem-se conjuntos como Escrivânia–Limeira–Ingleses, Planalto Cárstico Pedro Leopoldo–Confins, Planalto Cárstico Prudente de Moraes–Matosinhos, Planalto dissecado do Ribeirão da Mata, Planalto dissecado Serra de Santa Helena, Planalto Matosinhos–Vespasiano e a superfície rebaixada Lagoa Santa–Sete Lagoas. Em Pains, os agrupamentos incluem os blocos Intermediário, Ribeirão do Patos, São Francisco, São Miguel e Curimbará. Na Serra dos Carajás (CKS), são considerados conjuntos como Serra Arqueada, Serra da Bocaina, Serra de São Félix, Serra Leste, Serra Norte, Serra Rabo de Estrela e Serra Sul. Já no Quadrilátero Ferrífero (QDF), os agrupamentos incluem Escarpa Oriental do Caraça, João Monlevade, Quadrilátero Oeste, Serra Azul, Serra da Serpentina, Serra de Ouro Preto–Antônio Pereira e Serra do Gandarela.

Cada banco de dados é composto por cavernas pertencentes a um único grupo litológico, sendo Lagoa Santa e Pains caracterizadas por cavernas em rochas carbonáticas ( $\text{CaCO}_3$ ), CKS e QDF por cavernas em rochas ferríferas (Fe) e Espinhaço Meridional por cavernas em rochas siliciclásticas ( $\text{SiO}_2$ ). A distribuição das observações por banco de dados evidencia uma forte predominância de cavernas carbonáticas, seguidas por cavernas ferríferas e, em menor proporção, cavernas siliciclásticas, conforme sintetizado na Tabela 6, que apresenta o número de cavernas por banco de dados.

Banco de dados	Lagoa Santa	Pains	CKS	QDF	EM	Edealina	Carandaí
Número de Observações	1238	2499	1853	1219	259	7	30

Tabela 6. Número de cavernas por banco de dados.

A unificação dos bancos regionais e locais resultou em um banco consolidado com 7.001 observações, contendo 12 variáveis principais, entre elas: identificação da cavidade, tipo de cavidade, coordenadas UTM, projeção horizontal, desnível, área, volume, litologia, região de origem, elevação e unidade geomorfológica local. Esse processo de consolidação permitiu a realização de análises estatísticas integradas, mas também evidenciou limitações associadas à heterogeneidade dos bancos originais.

A partir do banco consolidado, foi realizada uma análise estatística descritiva detalhada, tanto para o conjunto total de dados quanto de forma estratificada por grupo litológico e por região. A Tabela 7 sintetiza os principais parâmetros estatísticos, incluindo média, desvio padrão, valores mínimo e máximo, percentis (P25, P50, P75), intervalo interquartil (IQR) e percentis adicionais, para as variáveis projeção horizontal, área e volume. Essa análise evidenciou, de maneira consistente, a presença de distribuições assimétricas à direita, com médias significativamente superiores às medianas, indicando a influência de valores extremos em todos os grupos litológicos analisados.

Atributo	Grupo Litológico	n	Média	Desvio Padrão	Min	Max	P50	P25	P75	IQR	P20
Projeção Horizontal	Carbonático	3667	44,86	130,59	5	3732,74	18,44	10,3	38,88	28,58	9,4
	Ferrífero	3051	27,22	38,1	5	465,09	14,8	9,3	28	18,7	8,47
	Siliciclástico	250	22,23	37,89	5,2	451	12,85	8,7	22,28	13,58	8,08

Área	Carbonático	2583	174,76	1469,89	0,19	56149,8	39,2	17,87	92,17	74,29	15
	Ferrífero	3051	91,97	199,72	1,19	6244	37,19	20,3	82	61,7	17,77
	Siliciclástico	250	86,62	437,65	3,8	6244	25,65	15,83	52,2	36,38	13,4
Volume	Carbonático	2614	322,12	2244,18	0	92725,79	68,19	25,24	180,37	155,13	21
	Ferrífero	3051	155,83	518,89	0	16923	43,05	18	119	101	15
	Siliciclástico	250	180,26	1422,13	3	16923	22	10	46,75	36,75	9

Tabela 7 - Estatísticas descritivas por variáveis e grupo litológico.

Os resultados descritivos mostram que cavernas carbonáticas tendem a apresentar maiores valores médios e maior variabilidade para projeção horizontal e área, enquanto cavernas ferríferas apresentam volumes médios mais elevados quando comparadas às cavernas siliciclásticas, que, por sua vez, exibem dimensões consideravelmente menores em todos os atributos analisados. Essas diferenças reforçam a inadequação de critérios únicos e rígidos de classificação, especialmente quando aplicados de forma indiferenciada a contextos litológicos distintos.

Uma vez que os critérios para definição das classes de importância alta, média e baixa dos atributos espeleométricos já se encontram definidos e consagrados no meio espeleológico (Tabela 8), e com base na caracterização detalhada da amostra, os estudos avançaram para a avaliação comparativa de critérios estatísticos voltados à identificação de valores extremos. Nesse contexto, o relatório técnico apresentou duas métricas alternativas ao critério atualmente vigente: o critério  $P75 + 3IQR$ , amplamente empregado na detecção de outliers conforme Tukey (1977), e o percentil 95 ( $P95$ ), que define como extremos os 5% superiores da distribuição. Para ambas as métricas, foi possível estimar o tamanho amostral necessário para a estabilização dos estimadores, sendo aproximadamente 35 observações para o  $P75 + 3IQR$  e 135 observações para o  $P95$ .

Classe de relevância	Critério estatístico
Baixo	Menor que o percentil 20 ( $< P20$ )
Médio	Maior ou igual ao percentil 20 e menor que a mediana ( $P20 \leq \text{valor} < P50$ )
Alto	Maior ou igual à mediana e menor ou igual ao valor correspondente a 8 vezes a mediana ( $P50 \leq \text{valor} \leq 8P50$ )
Máxima relevância	Maior que o valor correspondente a 8 vezes a mediana ( $> 8P50$ )

Tabela 8 – Critérios para definição da importância alta, média e baixa dos atributos espeleométricos

A análise comparativa dos critérios demonstrou uma relativa uniformidade na proporção de cavernas classificadas como extremas, ainda que com variações específicas. Enquanto o  $P95$  preserva, por construção, uma proporção próxima a 5%, o critério vigente ( $8P50$ ) apresentou variações entre 4% e 8,4%, e o  $P75 + 3IQR$  oscilou, em geral, entre 6% e 7%. Os estudos também evidenciaram que não há um padrão fixo para os pontos de corte absolutos, os quais variam conforme a métrica adotada e as características da distribuição dos dados.

Por fim, o relatório investigou o comportamento dos critérios em diferentes tamanhos amostrais, demonstrando que, em amostras pequenas, todos os métodos apresentam maior incerteza. À medida que o tamanho amostral aumenta, observa-se a estabilização dos estimadores e a convergência dos critérios para valores relativamente próximos, indicando concordância global entre as métricas, apesar de suas diferenças conceituais. Nesse contexto, o  $P95$  se destaca quando o objetivo é preservar uma proporção fixa de cavernas classificadas como extremas em escala nacional, enquanto o  $P75 + 3IQR$  se mostra mais equilibrado frente às características assimétricas das distribuições, convergindo globalmente para proporções da ordem de 6% a 7% para dados com propriedades semelhantes às analisadas.

## Quadro 1 - Síntese dos principais resultados do estudo estatístico para classificação de atributos espeleométricos de cavernas

Aspecto analisado	Síntese dos resultados
Métricas avaliadas	Foram analisadas duas métricas estatísticas: (i) P75 + 3IQR, e (ii) Percentil 95 (P95).
Fundamentação estatística	Ambas as métricas se baseiam em princípios estatísticos robustos, adequados a distribuições assimétricas e heterogêneas.
Tamanho amostral mínimo – P75 + 3IQR	O critério apresenta estabilização do estimador a partir de aproximadamente 35 observações.
Tamanho amostral mínimo – P95	A estabilização do estimador ocorre a partir de cerca de 135 observações.
Tamanho amostral	Recomenda-se a definição de tamanho amostral mínimo para análises locais e, em situações de amostras reduzidas, a realização de análises em escala regional, visando maior robustez estatística.
Comparação com o critério vigente (8P50)	A comparação permitiu avaliar variações nos pontos de corte e na proporção de cavernas classificadas como extremas por cada métrica.
Proporção de cavernas classificadas	O P95 manteve proporção próxima a 5%; o 8P50 variou entre 4% e 8,4%; e o P75 + 3IQR oscilou entre 6% e 7%, evidenciando relativa uniformidade entre os critérios.
Pontos de corte absolutos	Não foi identificado um padrão único para os valores absolutos de corte, os quais variam conforme a métrica adotada e as características da distribuição dos dados.
Consistência com a literatura	Os resultados corroboram Nicácio et al. (2017), que indicam o P75 + 3IQR como critério mais equilibrado frente à assimetria e heterogeneidade das distribuições dos atributos dimensionais de cavernas.
Comportamento em diferentes tamanhos amostrais	Em amostras pequenas, todos os critérios apresentam maior incerteza. Com o aumento do tamanho amostral, observa-se estabilização dos estimadores e convergência dos critérios para valores semelhantes.
Síntese conclusiva	As métricas P75 + 3IQR e P95 configuram alternativas estatisticamente consistentes ao critério vigente, sendo sua aplicação condicionada à escala de análise, ao tamanho amostral disponível e aos objetivos regulatórios pretendidos.

### 5.3 Seminário Técnico-Científico Dimensões Notáveis de Cavidade Natural Subterrânea



Um dos principais desdobramentos do projeto foi a realização do 1º Seminário Técnico-Científico Dimensões Notáveis de Cavidade Natural Subterrânea. Os estudos estatísticos desenvolvidos e apresentados nos itens anteriores constituíram seu principal subsídio técnico-científico. Os resultados obtidos, especialmente aqueles relacionados à avaliação de métricas estatísticas robustas, ao comportamento dos estimadores em diferentes tamanhos amostrais e às implicações da escala de análise (local e regional), fundamentaram as discussões técnicas conduzidas no evento e orientaram a construção coletiva das definições e dos encaminhamentos consolidados no relatório-síntese do seminário.

O Seminário foi realizado entre os dias 18 e 20 de março de 2025 em Brasília, tendo como objetivo principal reunir especialistas, pesquisadores, gestores, representantes do setor produtivo e da sociedade civil para debater critérios técnicos para o reconhecimento de

cavidades naturais subterrâneas de dimensões notáveis.

O evento contou com a participação de 29 representantes de instituições diversas, incluindo especialistas do meio acadêmico-científico (tais como IPA/SP, USP, UFMG e UFRN), membros da sociedade civil organizada (SBE), profissionais do setor produtivo (consultorias, empresas de mineração e meio ambiente) e gestores públicos (IBAMA, ICMBio/CECAV, Ministério das Minas e Energia, Ministério dos Transportes e Casa Civil),

todos com reconhecida expertise técnica ou responsabilidades normativas e de gestão no tema do patrimônio espeleológico.

Durante os três dias de programação, foram conduzidas atividades que abrangeram desde definições metodológicas e revisão de métodos estatísticos aplicáveis à identificação de atributos excepcionais de cavernas, até análises colaborativas em plenária e grupos de trabalho e construção coletiva de um texto final a ser considerado como subsídio à formulação normativa sobre dimensões notáveis.

O seminário foi estruturado por etapas:

i. parte: apresentações de nivelamento sobre o tema, exposição das abordagens estatísticas possíveis e debates iniciais sobre vantagens e limitações de diferentes métodos, promovendo a compreensão comum dos conceitos que dariam suporte às discussões subsequentes.

II. Discussões aprofundadas sobre a aplicação prática dos métodos estatísticos apresentados, incluindo debates em plenária e análise de desafios, bem como simulações exemplificativas conduzidas por especialistas visando compreender efeitos de tamanho amostral e variabilidade dos atributos espeleométricos nas diferentes abordagens.

III. Construção coletiva e consolidação dos resultados das discussões, culminando na formulação de um texto consolidado que sintetizou os principais consensos, pontos de atenção e contribuições técnicas resultantes dos debates.

Como parte dos encaminhamentos desse seminário, foram elaboradas contribuições que balizam definições técnicas para reconhecimento de dimensões notáveis de cavidades naturais subterrâneas, a partir de métricas estatísticas robustas como percentis (P95) e o critério  $P75 + 3IQR$ , de forma consistente com os resultados metodológicos discutidos nos itens anteriores do presente relatório.

O Seminário também ressaltou a importância de adotar critérios técnicos claros, com bases estatísticas apropriadas, para orientar a aplicação normativa e os processos de licenciamento ambiental relacionados às cavidades naturais subterrâneas, reforçando o papel do ICMBio e dos órgãos gestores em promover debates qualificados e fundamentos técnicos sólidos para tais regulamentações.

Como resultado das discussões técnicas conduzidas no âmbito do *Seminário Técnico-Científico Dimensões Notáveis de Cavidade Natural Subterrânea*, foram consolidadas as seguintes definições e encaminhamentos para o reconhecimento de cavidades naturais subterrâneas com dimensões notáveis, conforme texto aprovado no relatório-síntese do evento:

- 1) Substituir o termo “desenvolvimento linear” por “projeção horizontal (ph)” por ser amplamente utilizada e consolidada em diversos estudos e seu cálculo é metodologicamente mais preciso.
- 2) São consideradas cavidades naturais subterrâneas com dimensões notáveis aquelas que:
  - i. Apresentem dimensões iguais ou superiores ao percentil 95 (P95), quando o número de cavidades naturais subterrâneas for igual ou superior a 135 (cento e trinta e cinco), no enfoque local ou regional;
  - ii. Apresentem dimensões iguais ou superiores ao terceiro quartil somado a três vezes o intervalo interquartil (P75 + 3IQR), quando o número de cavidades naturais subterrâneas for igual ou superior a 35 (trinta e cinco) e inferior a 135 (cento e trinta e cinco), no enfoque local ou regional.
- 3) Nos casos em que, no enfoque local, o número de cavidades naturais subterrâneas seja inferior a 35 (trinta e cinco), o empreendedor deverá aumentar os esforços amostrais. Caso, após esse incremento,

o número de cavidades naturais subterrâneas permaneça inferior a 35 (trinta e cinco), deverá ser adotado exclusivamente o enfoque regional.

- 4) Nos casos em que, no enfoque regional, o número de cavidades naturais subterrâneas seja inferior a 35 (trinta e cinco), o empreendedor deverá aumentar os esforços amostrais. Persistindo a amostra inferior a esse quantitativo, dada a excepcionalidade, serão classificadas como de dimensões notáveis aquelas correspondentes às X% maiores em cada um dos atributos analisados.

Observação: As cavidades naturais subterrâneas com projeção horizontal inferior a 5 (cinco) metros não serão consideradas para fins dos cálculos espeleométricos.

## 6. Conclusões e Recomendações

O presente relatório consolidou uma avaliação técnica e estatística aprofundada dos métodos empregados para o levantamento e a interpretação de atributos espeleométricos com foco na análise comparativa dos métodos de cálculo do volume, enfatizando as diferenças entre abordagens baseadas em topografia espeleológica convencional e aquelas fundamentadas em modelos tridimensionais, bem como as implicações dessas diferenças para a classificação de atributos dimensionais de cavidades naturais subterrâneas no contexto do licenciamento ambiental.

As análises empíricas demonstraram que o volume obtido por topografia espeleológica convencional apresenta variabilidade significativa, fortemente condicionada à densidade e à distribuição das seções topográficas ao longo da cavidade. Os resultados indicaram que o erro associado a esse método possui caráter predominantemente aleatório, não apresentando correlação sistemática com atributos geométricos globais, como projeção horizontal, área ou desnível. Esse comportamento reforça que a confiabilidade do volume convencional depende diretamente da qualidade do levantamento, do rigor metodológico empregado e, sobretudo, do número e da adequada distribuição das seções.

Nesse sentido, o relatório não conclui pela inadequação da topografia espeleológica convencional, mas evidencia que sua aplicação exige critérios técnicos mais rigorosos, incluindo maior densidade de seccionamento, padronização dos procedimentos de campo e gabinete e estrita observância a diretrizes técnicas consolidadas, a exemplo da British Cave Research Association (BCRA), da Union Internationale de Spéléologie (UIS) e mais recentemente as do CECAV para realização de mapa topográfico de caverna. A utilização do volume convencional como parâmetro analítico demanda, portanto, cautela e contextualização, especialmente no âmbito do licenciamento ambiental.

Por sua vez, os métodos tridimensionais baseados em escaneamento a laser demonstraram maior consistência na representação da geometria interna das cavidades e na estimativa de volumes, uma vez que reduzem a dependência de simplificações geométricas inerentes às representações bidimensionais. Todavia, o relatório também evidenciou limitações relevantes para a adoção ampla dessas tecnologias, relacionadas ao elevado custo dos equipamentos, à necessidade de equipes especializadas, às dificuldades operacionais em ambientes subterrâneos de difícil acesso e às decisões técnicas envolvidas no processamento das nuvens de pontos. Esses fatores restringem sua aplicação sistemática no contexto do licenciamento ambiental, especialmente em estudos de maior escala, pelo menos no cenário atual.

No campo estatístico, os estudos realizados em parceria com o Departamento de Estatística da UFMG demonstraram que os atributos dimensionais das cavernas apresentam distribuições assimétricas e heterogêneas, o que limita a adequação de critérios baseados exclusivamente em medidas centrais. A avaliação comparativa entre o critério atualmente vigente (8P50) e métricas alternativas, como o P75 + 3IQR e o percentil 95 (P95), evidenciou que diferentes métricas podem resultar em pontos de corte distintos, embora apresentem relativa uniformidade na proporção de cavernas classificadas como extremas. Os

resultados também demonstraram que o comportamento dos estimadores é fortemente influenciado pelo tamanho amostral e pela escala de análise adotada (local ou regional).

Um dos principais avanços metodológicos do projeto foi a incorporação sistemática de análises estatísticas especializadas à espeleologia aplicada, permitindo a proposição de métricas mais robustas e tecnicamente fundamentadas para a classificação de relevância de atributos dimensionais. Esses resultados constituíram o principal subsídio técnico-científico para a realização do 1º Seminário Técnico-Científico Dimensões Notáveis de Caverna Natural Subterrânea, no qual foram debatidas, validadas e consolidadas definições e encaminhamentos voltados à atualização de critérios normativos, especialmente no que se refere à consideração do tamanho amostral, da escala de análise e da escolha de métricas estatísticas apropriadas.

Apesar dos avanços alcançados, o relatório reconhece limitações remanescentes, relacionadas principalmente à heterogeneidade dos bancos de dados disponíveis, à concentração de determinadas litologias e regiões na amostra analisada e às incertezas associadas a amostras reduzidas. Tais limitações reforçam a necessidade de abordagens graduais, criteriosas e tecnicamente fundamentadas na aplicação dos critérios propostos, bem como da contínua ampliação e qualificação das bases de dados espeleométricos utilizadas no licenciamento ambiental.

### **6.1 Recomendações finais**

Com base nos resultados técnicos, estatísticos e metodológicos apresentados, recomenda-se que os processos de licenciamento ambiental que envolvam cavernas naturais subterrâneas incorporem critérios mais rigorosos, transparentes e padronizados para o levantamento e a interpretação dos atributos espeleométricos, em especial aqueles relacionados ao cálculo do volume.

No que se refere à topografia subterrânea convencional, recomenda-se que sua utilização seja acompanhada da adoção de procedimentos metodológicos rigorosos, com ênfase no aumento da densidade e na adequada distribuição das seções topográficas ao longo da caverna, de modo a reduzir a variabilidade aleatória associada à subamostragem da geometria interna das cavernas.

Não se descarta o uso de tecnologias de escaneamento tridimensional, contudo, fatores como custo, logística, necessidade de mão de obra especializada e limitações operacionais em ambientes subterrâneos podem comprometer a qualidade e a precisão do levantamento e dos resultados obtidos, restringindo sua aplicação ampla e sistemática no licenciamento ambiental. Nesses casos, a adoção dessas tecnologias deve ser precedida de avaliação técnica quanto à sua viabilidade e pertinência em cada situação específica.

No campo da classificação de relevância de atributos dimensionais, recomenda-se a adoção de métricas estatísticas robustas, compatíveis com a natureza assimétrica e heterogênea das distribuições espeleométricas. Os resultados indicam que critérios como o  $P75 + 3IQR$  e o percentil 95 (P95) apresentam vantagens metodológicas em relação a abordagens baseadas exclusivamente em medidas centrais, especialmente quando associados à definição explícita de tamanhos amostrais mínimos e à consideração da escala de análise (local ou regional).

Recomenda-se, ainda, que a aplicação desses critérios esteja condicionada ao tamanho da amostra disponível, conforme discutido nos estudos estatísticos apresentados, privilegiando análises em nível local quando houver número suficiente de cavernas e, alternativamente, a adoção do enfoque regional em situações de amostras reduzidas. Essa abordagem contribui para maior robustez estatística, segurança jurídica e previsibilidade decisória nos processos de licenciamento ambiental.

Nesse contexto, recomenda-se que os resultados deste projeto, bem como os consensos técnicos consolidados no âmbito do 1º Seminário Técnico-Científico Dimensões Notáveis de Caverna Natural

Subterrânea, sejam considerados como subsídio técnico-científico para o aperfeiçoamento de normativas, protocolos e orientações operacionais relacionadas à caracterização, classificação e gestão do patrimônio espeleológico no Brasil, incentivando a continuidade de estudos integrados, a ampliação das bases de dados espeleométricos e o fortalecimento da articulação entre ciência, gestão ambiental e processos regulatórios.

## 7. Referências bibliográficas

BCRA – BRITISH CAVE RESEARCH ASSOCIATION. Cave surveying. Buxton: British Cave Research Association, 2002.

BRASIL. Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Diário Oficial da União, Brasília, 2 out. 1990.

BRASIL. Decreto nº 6.640, de 7 de novembro de 2008. Dá nova redação aos arts. 1º, 2º, 3º, 4º e 5º e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990. Diário Oficial da União, Brasília, 10 nov. 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução Normativa nº 02, de 30 de agosto de 2017. Dispõe sobre procedimentos espeleológicos no âmbito da gestão do patrimônio espeleológico. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 31 ago. 2017. Disponível em: [https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/orientacoes-e-procedimentos/legislacao-espeleologica/in-02\\_2017\\_mma\\_30ago17.pdf](https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/orientacoes-e-procedimentos/legislacao-espeleologica/in-02_2017_mma_30ago17.pdf). Acesso em: 15 jan. 2026.

CALUX, Allan; CRUZ, Jocy; ARAÚJO, Ramon; LOTT, Fred; BRANDI, Iuri. O cálculo do volume de cavernas no contexto do licenciamento ambiental: estudo comparativo. In: III Simpósio Mineiro do Carste. Anais. Belo Horizonte, 2017.

CANAVESE, E. P.; FORTI, P.; NASEDDU, A.; OTTELLI, L.; TEDESCHI, R. Laser scanning technology for the hypogean survey: the case of Santa Barbara karst system (Sardinia, Italy). Acta Carsologica, v. 40, n. 1, p. 65–77, 2011. DOI: 10.3986/ac.v40i1.29.

CECAV – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. Projeto “Aprimoramentos Metodológicos para o Levantamento de Atributos Espeleométricos no Rito do Licenciamento Ambiental”. Anexo X do Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica nº 1/2018. Brasília: ICMBio, 2018.

CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS – ICMBio/CECAV. *Relatório Técnico: 1º Seminário Técnico-Científico Dimensões Notáveis de Cavidade Natural Subterrânea*. Brasília: ICMBio, 2025. Disponível em: [https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/publicacoes/20250425\\_cecav\\_seminariodimensoesnotaveis\\_relatoriosintese.pdf](https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/publicacoes/20250425_cecav_seminariodimensoesnotaveis_relatoriosintese.pdf)

CECAV – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. Diretrizes e orientações técnicas para a realização de mapa topográfico de caverna. Minuta técnica. Brasília: ICMBio, 2025.

CHABERT, C.; WATSON, R. A. Mapping and measuring caves: a conceptual analysis. NSS Bulletin, v. 43, n. 1, p. 3–11, 1981.

COSSO, T.; FERRANDO, I.; ORLANDO, A. Surveying and mapping a cave using 3D laser scanner: the open challenge with free and open source software. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XL-5, p. 181–186, 2014. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-181-2014.

DAY, Alan. Cave surveying. Buxton: British Cave Research Association, 2002.

FERNANDES, Adam Barros et al. Comparação entre métodos de levantamento topográfico de cavernas ferríferas: estudo de caso na Amazônia Brasileira. Revista Brasileira de Cartografia, v. 76, 2024. DOI: 10.14393/rbcv75n0a-71241.

FERNANDES, Adam Barros et al. Mapeamento topográfico de cavernas no setor mineral: avanços e novas tecnologias. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, n. 3, e2315, 2023. DOI: 10.20502/rbg.v24i3.2315.

FONTENELLE, Mariana Rodrigues; PRATES, Marcos Oliveira. *Aprimoramentos metodológicos para o levantamento de atributos espeleológicos no rito do licenciamento ambiental*. Relatório final. Projeto de Pesquisa nº 042/2023. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Estatística, 2024.

HÄUSELMANN, P. UIS mapping grades. *International Journal of Speleology*, v. 40, p. IV–VI, 2011.

LIMA, Thiago. Mapeamento de cavidades hospedadas por rochas ferríferas e/ou ferruginosas com uso de sensor LiDAR: o caso da Caverna do Manso. In: 19th International Congress of Speleology e 38º Congresso Brasileiro de Espeleologia. Anais. Belo Horizonte, 2025.

PEREIRA, Ricardo Galeno Fraga de Araújo; GROHMANN, Carlos Henrique; NASCIMENTO, Marcos Antonio Leite do. Nota Técnica: o significado de cavernas com dimensões notáveis na avaliação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas. Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), [s.d.]. Disponível em: <https://www.sbgeo.org.br/home/news/1064>. Acesso em: 22 dez. 2025.

SIMÕES, Paulo Rodrigo Gaiotti. *Mapeamento espeleológico tridimensional: aplicações, limitações e integração metodológica no levantamento de cavidades naturais subterrâneas*. 2025. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2025.

TUKEY, J. W. (1977). *Exploratory data analysis*. Addison-Wesely.



# TCCE ICMBio / VALE

COMPENSAÇÃO ESPELEOLÓGICA

Termo de compromisso



Coordenação Executiva



Gestão Operacional



## **ANEXO I**

Relação de cavidades analisadas e respectivos  
atributos espeleométricos

Item	Cavidade	PH (m)	Desn (m)	Area (m²)	Qtd. Seções	Area/Seção	Vol (m³)	Vol (m³) Laser Scan	variação percentual	Erro [(Volc/Vols)-1]
1	Cav_001	120	9.6	672	12	56.00	2050.00	2501.64	-18.05%	-0.18
2	Cav_002	65	6	238	1	238.00	576	547.086	5.29%	0.05
3	Cav_003	30	3.2	102	3	34.00	139	189.83	-26.78%	-0.27
4	Cav_004	175	12.4	715	12	59.58	1550	1431.181	8.30%	0.08
5	Cav_005	65	5.6	216	4	54.00	493	471.191	4.63%	0.05
6	Cav_006	162	18	556.8	10	55.68	923	867	6.46%	0.06
7	Cav_007	14	3.5	22	2	11.00	35.2	28.641	22.90%	0.23
8	Cav_008	11	0.8	12.8	2	6.40	18.6	25.9	-28.19%	-0.28
9	Cav_009	11.2	1.2	15.4	1	15.40	20	18.8	6.38%	0.06
10	Cav_010	30.6	3.6	82.1	3	27.37	90	67.271	33.79%	0.34
11	Cav_011	10.3	3	13.4	2	6.70	26.4	18.75	40.80%	0.41
12	Cav_012	9.6	2.1	26.1	1	26.10	62.3	123.356	-49.50%	-0.49
13	Cav_013	23.1	1.1	39.7	2	19.85	44.1	33.14	33.07%	0.33
14	Cav_014	14	1.7	9.4	2	4.70	8	2.129	275.76%	2.76
15	Cav_015	17	2	45	3	15.00	108	87.344	23.65%	0.24
16	Cav_016	3.24	5.8	15	2	7.50	35	109.573	-68.06%	-0.68
17	Cav_017	16.4	5.1	33.7	3	11.23	37	17.59	110.35%	1.10
18	Cav_018	12.5	7	95	2	47.50	300	699.09	-57.09%	-0.57
19	Cav_019	35	1	112	3	37.33	196	134.269	45.98%	0.46
20	Cav_020	15.5	1.7	41	2	20.50	65	46	41.30%	0.41
21	Cav_021	9.5	0.4	29	2	14.50	21.7	75.7	-71.33%	-0.71
22	Cav_022	22.6	0.93	30	2	15.00	34	39.7	-14.36%	-0.14
23	Cav_023	10.6	3.5	29	2	14.50	19	12.36	53.72%	0.54
24	Cav_024	8.5	2.8	38	2	19.00	122	102.11	19.48%	0.19
25	Cav_025	14	0.5	36	2	18.00	48	42.6	12.68%	0.13
26	Cav_026	10.2	1.8	90.6	2	45.30	115	69.37	65.78%	0.66
27	Cav_027	10.7	0.6	11	2	5.50	8.8	5	76.00%	0.76
28	Cav_028	13	0.1	27	2	13.50	17	23.41	-27.38%	-0.27
29	Cav_029	130	11.8	515.5	5	103.10	927	712.72	30.07%	0.30
30	Cav_030	10	2.5	30	2	15.00	52.5	55.55	-5.49%	-0.05
31	Cav_031	12	2.97	35	2	17.50	63.5	65.7	-3.35%	-0.03
32	Cav_032	12.5	2.21	61	2	30.50	107.5	86.87	23.75%	0.24
33	Cav_033	8.5	1.61	40.5	2	20.25	75.5	89.14	-15.30%	-0.15
34	Cav_034	42.5	9.65	252	2	126.00	448.5	137.69	225.73%	2.26
35	Cav_035	79	11.97	250	2	125.00	392.5	55.96	601.39%	6.01
36	Cav_036	16	2.04	20.5	2	10.25	30.5	13.36	128.29%	1.28
37	Cav_037	10.5	0.69	25.5	2	12.75	25	22.68	10.23%	0.10
38	Cav_038	43	5.5	152	3	50.67	350	494.09	-29.16%	-0.29
39	Cav_039	23.5	7.89	182	2	91.00	278.5	176.07	58.18%	0.58
40	Cav_040	72	3.96	369	4	92.25	716	590.8	21.19%	0.21
41	Cav_041	10	1	32	2	16.00	57.5	53.33	7.82%	0.08
42	Cav_042	7.5	1.91	37.5	2	18.75	26.5	15.43	71.74%	0.72
43	Cav_043	19	2.63	21	2	10.50	29	19.61	47.88%	0.48
44	Cav_044	12	2.28	32	2	16.00	31	17.12	81.07%	0.81

Item	Cavidade	PH (m)	Desn (m)	Area (m²)	Qtd. Seções	Area/Seção	Vol (m³)	Vol (m³) Laser Scan	variação percentual	Erro [(Volc/Vols)-1]
45	Cav_045	10.5	1.06	21	2	10.50	14.5	3.33	335.44%	3.35
46	Cav_046	20	2.82	94	2	47.00	85	84.7	0.35%	0.00
47	Cav_047	109	7.66	387	7	55.29	557.5	317.11	75.81%	0.76
48	Cav_048	28	3.74	72.5	2	36.25	104	86.33	20.47%	0.20
49	Cav_049	81	2.52	68.5	2	34.25	51	6.51	683.41%	6.83
50	Cav_050	38	5.85	156	2	78.00	181	35.7	407.00%	4.07
51	Cav_051	25	3.42	58	2	29.00	155	146.79	5.59%	0.06
52	Cav_052	5.5	1	23.4	2	11.70	43.2	45.28	-4.59%	-0.05
53	Cav_053	11	3.15	26	2	13.00	23	24.04	-4.33%	-0.04
54	Cav_054	22.6	2.8	41	3	13.67	44	48.14	-8.60%	-0.09
55	Cav_055	9.3	0.7	69.2	2	34.60	178	160.47	10.92%	0.11
56	Cav_056	16	3	27	5	5.40	31.84	42.853	-25.70%	-0.26
57	Cav_057	104	11	452	6	75.33	1104.9	986.028	12.06%	0.12
58	Cav_058	20.68	2.93	31.5	2	15.75	16	15.634	2.34%	0.02
59	Cav_059	6	0.5	18	2	9.00	15	14.132	6.14%	0.06
60	Cav_060	8.3	1.6	19	2	9.50	22	20.803	5.75%	0.06
61	Cav_061	25	2	72	3	24.00	72	68.073	5.77%	0.06
62	Cav_062	20	0.6	40	3	13.33	36	28.943	24.38%	0.24
63	Cav_063	32	3	88	4	22.00	88	75.557	16.47%	0.16
64	Cav_064	34	0.8	101	2	50.50	152	141	7.80%	0.08
65	Cav_065	24.5	2	53.6	2	26.80	55	51.6	6.59%	0.07
66	Cav_066	9.3	0.3	9	2	4.50	5	5.5	-9.09%	-0.09
67	Cav_067	16.2	0.8	24	2	12.00	13	10.9	19.27%	0.19
68	Cav_068	120.4	33	728.1	8	91.01	2184.5	2183.9	0.03%	0.00
69	Cav_069	78	4	662	5	132.40	1496	949.6	57.54%	0.58
70	Cav_070	66	4.5	500	3	166.67	1375	975.7	40.92%	0.41
71	Cav_071	98	8	540	10	54.00	1373	1297.5	5.82%	0.06
72	Cav_072	233	12.9	1198	4	299.50	2995	2072.1	44.54%	0.45
73	Cav_073	224	16	884	11	80.36	1779	1557.5	14.22%	0.14
74	Cav_074	221	13.6	666	15	44.40	1007	861	16.96%	0.17
75	Cav_075	32.51	2.19	67.32	1	67.32	127	96.15	32.09%	0.32
76	Cav_076	66.65	2.68	114.23	3	38.08	134	90.79	47.59%	0.48
77	Cav_077	16.74	1.83	57.35	2	28.68	79	380.5	-79.24%	-0.79
78	Cav_078	11.86	2.67	50.94	2	25.47	123	43.09	185.45%	1.85
79	Cav_079	60.66	10.4	147.78	4	36.95	194	94.87	104.49%	1.04
80	Cav_080	26.87	4.25	78.83	2	39.42	118	85.91	37.35%	0.37
81	Cav_081	11.7	3.76	46.56	2	23.28	37	13.85	167.15%	1.67
82	Cav_082	13.49	1.46	72.02	2	36.01	107	54.88	94.97%	0.95
83	Cav_083	45.86	2.24	122.24	5	24.45	130	143.89	-9.65%	-0.10
84	Cav_084	20.92	0.97	36.97	2	18.49	33	35.48	-6.99%	-0.07
85	Cav_085	74.42	3.75	299.29	4	74.82	523	361.53	44.66%	0.45
86	Cav_086	54.56	6.25	97.34	6	16.22	83	41.23	101.31%	1.01
87	Cav_087	57.39	3.86	131.13	4	32.78	220	65.61	235.31%	2.35
88	Cav_088	44.41	2.54	82.74	4	20.69	147	89.2	64.80%	0.65

Item	Cavidade	PH (m)	Desn (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Qtd. Seções	Area/Seção	Vol (m <sup>3</sup> )	Vol (m <sup>3</sup> ) Laser Scan	variação percentual	Erro [(Volc/Vols)-1]
89	Cav_089	20.59	1.92	60.31	2	30.16	99	1187.1	-91.66%	-0.92
90	Cav_090	45.17	7.58	112.86	3	37.62	121	65.45	84.87%	0.85
91	Cav_091	30	4.55	46.39	2	23.20	27	22.87	18.06%	0.18
92	Cav_092	15.51	2.97	33.51	2	16.76	22	24.21	-9.13%	-0.09
93	Cav_093	117	6.6	618.5	4	154.63	1706	1176.4	45.02%	0.45