



ANAIS do 20º Congresso Nacional de Espeleologia

Brasília DF, 19-23 de julho de 1989 - ISSN 2178-2113 (online)



O artigo a seguir é parte integrando dos Anais do 20º Congresso Nacional de Espeleologia disponível gratuitamente em www.cavernas.org.br/20cbeanais.asp

Sugerimos a seguinte citação para este artigo:

ARAÚJO, A.H.. Espeleometria: uma abordagem técnico-científica. In: RASTEIRO, M.A.; SANTOS-NETO, C.J.. (orgs.) CONGRESSO NACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 20, 1989. Brasília. *Anais...* Campinas: SBE, 2017. p.35-39. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais20cbe/20cbe_035-039.pdf>. Acesso em: *data do acesso*.

Consulte outras obras disponíveis em www.cavernas.org.br



ESPELEOMETRIA: UMA ABORDAGEM TÉCNICO-CIENTÍFICA

Albano H. ARAÚJO.

RESUMO

Este trabalho visa lançar novos conceitos acerca da classificação dos mapeamentos em cavidades naturais, de maneira a conferir a estes mapeamentos um caráter técnico e prático. A metodologia usada foi baseada na análise estatística de dados de mapeamentos disponíveis e na coleta de dados específicos para a realização do estudo. São estabelecidos novos níveis de acurácia e de detalhamento baseados os primeiros no erro instrumental e operacional do equipamento usado, e os últimos na densidade de pontos topografados.

INTRODUÇÃO

A topografia de superfície tem se caracterizado, principalmente nos últimos tempos, pela alta precisão e eficiência, lançando mão de artifícios como as fotos aéreas, as imagens de satélite, o mapeamento de superfície, etc. Tudo isso enlaçado e fortemente alicerça do sobre os conceitos que regem e direcionam esta arte de mapear, conceitos estes de caráter iminentemente técnicos e matemáticos.

Apesar disso, no meio espeleológico, a maioria destes conceitos de fundamental importância são totalmente desprezados, como se o mapeamento de subsuperfície não estivesse sujeito às mesmas leis e postulados matemáticos.

É inegável, por outro lado, a enorme diferença entre o ambiente de superfície e o cavernícola, mas isto não serve de alibi para se desprezar o raciocínio lógico e racional quando tratamos de mapeamentos em cavernas.

Este trabalho parte do pressuposto de que toda atividade de mensuração, seja ela em superfície ou não, tem de estar completamente amparada pelos conceitos fundamentais de cunho técnico e também científico, sem os quais medir se reduz a supor, a estimar.

A classificação correta e coerente das topografias permite ao espeleólogo identificar a utilidade de um mapa para a realização de um trabalho científico, ou mesmo, saber se a única utilidade do referido mapa é ocupar espaço em mapotecas e servir de guia simplificado para turistas incautos.

O PROBLEMA

A atual classificação usada para as topografias em cavidades naturais não apresenta significado plausível para utilização em trabalhos científicos em espeleologia, o que está intimamente

ligado ao baixo nível dos trabalhos espeleológicos realizados em nosso país. Deparamo-nos então com um problema fundamental:

Ω Classificar o mapeamento dentro de níveis de acurácia e detalhamento que permitam a sua utilização correta e segura em trabalhos posteriores.

É fundamental conferir aos níveis de acurácia e detalhamento um significado físico real, relacionado às características inerentes ao Espeleomapeamento. Sendo assim, de posse de um mapa classificado dentro dos níveis de acurácia e detalhamento aqui propostos, o espeleólogo poderá, de pronto, saber se o referido mapa oferece a precisão que ele necessita para a realização de um estudo ou se será necessário novo mapeamento ou detalhamento dos dados.

O ERRO NA TOPOGRAFIA –

UMA ABORDAGEM MATEMÁTICA E ESTATÍSTICA

Muitos são os erros aos quais estão sujeitas as medições. Faz-se mister aqui diferenciar o erro aleatório do sistemático, pois o primeiro é imprevisível e não pode ser evitado, estando associado a toda e qualquer medida. Já o erro sistemático se refere a, por exemplo, erro na calibragem do instrumento de medição, erros em função da variação da temperatura, etc.

Consideraremos aqui apenas o erro aleatório, pois o erro sistemático pode ser evitado tomando-se medidas simples como a manutenção do equipamento, treinamento adequado do operador entre outras.

O erro aleatório está associado ao processo natural de medição, ou seja, é inerente ao próprio ato de medir, com isso, estatisticamente falando, a possibilidade de que uma medida esteja correta é nula. Corroborar para isso a existência em todo e

qualquer instrumento do limite de precisão, limite este associado à escala do referido instrumento.

Para melhor entender o limite de precisão utilizaremos o exemplo de uma régua comum, milimetrada. Será impossível nesta régua ler os décimos de milímetro com certeza, e eles terão que ser estimados. Nenhum novo algarismo pode ser adicionado à medida feita, após este último que foi estimado, pois implicaria em um erro elementar inadmissível. Matematicamente, apenas um algarismo pode ser estimado na realização de uma medida compondo o conjunto dos algarismos significativos, com aqueles que foram lidos com certeza.

Com isso vemos que o limite de precisão de um instrumento não pode ser ultrapassado em nenhuma hipótese, ou em outras palavras, nenhum instrumento pode fornecer uma precisão maior que a permitida pela sua escala.

O limite de precisão de um instrumento qualquer é igual à metade da sua menor escala (no exemplo da régua milimetrada ele seria de +0,05cm). A tabela 1 apresenta uma série de instrumentos de medição com seus limites de precisão associados.

É importante ressaltar que o limite de precisão é inerente ao instrumento utilizado e não depende do tipo ou dimensão da medida feita, por isso este erro será doravante chamado de erro de precisão instrumental.

No que se refere ao erro de uma topografia, no entanto, o erro de precisão instrumental é de importância secundária cabendo o maior peso ao erro relacionado ao ato físico de medir, ou seja, o erro relacionado ao fato de operar o instrumento de medição.

Esta modalidade de erro, chamada Erro Operacional difere da modalidade anterior por ser inerente ao processo de medição e não ao instrumento utilizado, apesar de que, quanto maior o erro de precisão instrumental, maior será o erro operacional, obviamente.

Teoricamente este erro pode ser eliminado por uma operação 'perfeita' do instrumento de medição, mas esta situação ideal é impossível de ser atingida, por isso o erro operacional está presente em qualquer medida.

Como exemplo para este tipo de erro consideremos, por simplicidade, o caso do uso de uma trena. Quando a trena é esticada seu peso força o aparecimento de uma curvatura na sua porção

central o que, por sua vez, implica no fato de que o valor lido será maior que a distância real além de haver, também, um erro na medida do ângulo de inclinação, como mostra a figura 1.



Fig. 1 - Superestimação da medida realizada devido à curvatura da trena. O ângulo α de inclinação também está superestimado.

Obs.: A curvatura da trena está exagerada.

Este erro não pode ser medido diretamente, pois a distância real não é conhecida, mas pode ser estimado e/ou calculado quando do fechamento de uma poligonal.

Todos os instrumentos de medição mostram um fenômeno semelhante, ou seja, têm associado ao seu uso um erro operacional.

Na Tabela 2 apresentamos o erro operacional médio para uma série de instrumentos de medição. Estes valores foram obtidos através da análise estatística de um grande número de dados, por isso mesmo, os valores observados na tabela 2 não são valores-padrão, mas valores com significado estatístico e matemático lógico e fisicamente plausível.

O erro operacional, devido a sua própria natureza, pode ou não depender do tipo (linear ou angular) ou da dimensão (grande ou pequena) da medida. Para o caso da trena ele é diretamente proporcional ao comprimento da visada, já no caso de um teodolito, no limite entre 0 e 100m aproximadamente, o erro é inversamente proporcional ao comprimento da visada. Em geral o erro operacional independe da dimensão da medida no caso de mensuração angular e depende no caso de mensuração linear (distância). Na Tabela 3 temos um resumo dos tipos de erros e de suas características.

É o erro operacional, associado ao limite de precisão, que aparece na hora do fechamento de uma poligonal, por exemplo. Eles representam o erro da topografia e, por isso, servirão para indicar o nível de acurácia da mesma.



Passemos agora a analisar dois tipos de erros de natureza completamente distinta dos anteriores. Trata-se do erro associado a operações de cálculo e ao erro associado à escala do mapa. Diferem fundamentalmente dos anteriores, pois suas esferas de ação restringem-se ao processo de confecção do mapa e de preparação dos dados e não implicam em erro no mapeamento propriamente dito. Estes dois tipos de erros, portanto, não interferem na precisão da topografia, mas na qualidade da confecção do mapa.

O erro associado a operações de cálculo, ou melhor, o erro de propagação matemática, se relaciona diretamente ao limite de precisão e se baseia no fato de que, operando matematicamente duas medidas que têm associados erros inerentes (o limite de precisão), esses erros também devem ser operados matematicamente. À operação matemática desses erros dá-se o nome de propagação do erro, daí o nome adotado.

Este erro pode ser calculado pela fórmula geral:

$$\text{Erro} = \left[\frac{\partial x}{\partial y} \right] \Delta x$$

Onde:

∂x = derivada parcial da função com relação a x .

∂y = derivada parcial da função com relação a y .

Δx = valor da função em x .

Para se ter uma idéia do significado físico desse erro, no caso da medição da distância horizontal com um teodolito, temos a fórmula:

$$\text{Distância Horizontal} = sK \cos^2 \alpha \quad (1)$$

Onde:

s = diferença entre a leitura superior e a inferior na mira

K = constante do instrumento

α = ângulo de Inclinação

Para esse caso o erro de cálculo que está associado a multiplicação dos fatores s e $\cos^2 \alpha$ advém da existência dos erros Δs e $\Delta \alpha$ respectivamente para as medidas s e α . A equação (1) pode ser reescrita como:

$$D.H. = (\bar{s} \pm \Delta s) K \cos^2 (\bar{\alpha} \pm \Delta \alpha)$$

Onde:

\bar{s} = valor medido de s

$\bar{\alpha}$ = valor medido de α

Daí, o erro propagado matematicamente será igual a:

$$DH \pm \Delta DH = sK \cos^2 \alpha \pm K (\bar{s} \operatorname{sen}^2 \bar{\alpha} \operatorname{sen}^2 \Delta \alpha + \cos^2 \bar{\alpha} \Delta s)$$

Apesar de parecer que esse erro não tem muita importância devido ao seu pequeno valor, ele serve para demonstrar a impossibilidade de se fazer uma topografia cuja acurácia seja maior que a do instrumento de medição usado.

O erro de escala não é, propriamente, um erro no sentido que costumamos dar a esse termo. O que acontece é que, em função da escala, erros milimétricos na confecção do mapa podem ter uma expressão física bem avantajada, o que, no caso de cavidades naturais, principalmente naquelas de pequeno porte, pode ter uma influência considerável.

De posse dos dados das tabelas 1 e 2, e em acordo com as observações já feitas, podemos passar agora à questão da divisão dos níveis de acurácia em topografia.

NÍVEL DE ACURÁCIA:

UMA ANÁLISE LÓGICA E RACIONAL

Os atuais níveis de precisão utilizados para classificação das espeleotopografias são desprovidos de significado lógico e, portanto, de uso restrito. Além do mais, a incoerência desses parâmetros vem dando margem a classificações absurdas, como aquelas que colocam topografias feitas com trena e bússola com precisões maiores que a oferecida pelo instrumento.

Partindo da concepção de que os parâmetros para divisão dos níveis de acurácia devem ter um forte significado físico, lógico e plausível, enumeramos as qualidades necessárias a este novo conjunto de parâmetros, que são:

- Ω a amplitude dos níveis deve refletir a precisão dos instrumentos utilizados e, principalmente, ser proporcional ao seu erro operacional; e
- Ω os limites dos níveis de acurácia não devem estar próximos aos valores dos erros obtidos nas topografias, para que não ocorram dúvidas sobre em qual nível encaixar o trabalho.

Além do mais, como consideramos que espeleometria seja a atividade de mensuração instrumental das cavidades naturais, somente os levantamentos instrumentais podem ser



considerados como mapeamento e, portanto, ser classificados dentro de níveis de acurácia.

O erro operacional médio (Tabela 2) de alguns instrumentos de medição serve para nos dar uma ideia da variação da precisão do referido instrumento, em função das suas condições de uso. É óbvio que, quanto mais adversas as condições de uso, menor a precisão do trabalho (teoricamente).

Utilizando uma grande bateria de valores que inclui dados de topografias reais e de simulação, obtivemos uma distribuição estatística para o erro operacional, o que pode ser visto no gráfico 1.

O gráfico foi analisado minuciosamente e foram identificadas e individualizadas 6 subpopulações dentro da população amostrada. Por simplicidade, não nos alongaremos na questão da representatividade desta população amostrada relativamente à população alvo, mas que remos esclarecer que foram usados dados da maior confiabilidade possível, em número mais que suficiente, extraído de trabalhos que representavam cavidades com características bastante distintas, visando, assim, abarcar todo o universo de mudanças espeleomorfológicas possíveis.

Uma vez separadas as 6 subpopulações fizemos testes estatísticos para confirmar as características de cada uma e, então, passamos a segunda fase, que foi coadunar estas observações estatísticas com a realidade espeleológica, lançando não das duas suposições feitas anteriormente, quais sejam, a amplitude dos níveis de acurácia deve estar relacionada ao erro operacional médio e os seus limites não devem estar próximos à média dos erros das topografias. Com isso chegamos à situação ilustrada na Tabela 3, que apresenta os níveis de acurácia, os instrumentos de medição com os quais podem ser atingidos, as condições prováveis de dificuldade de mapeamento e, o mais importante, a utilidade do mapa classificado em cada nível.

É importante frisar que os parâmetros estabelecidos na referida tabela são passíveis de discussão e surgiram como uma tentativa de conferir aos níveis de acurácia qualidades como a lógica, a utilidade prática e a simplicidade. Não são, de nenhuma forma, valores absolutamente corretos ou perfeitos, mas o que mais conseguimos nos aproximar disso.

NÍVEIS DE DETALHAMENTO:

UMA DISCUSSÃO SIMPLES E CONCISA

Dentro da espeleometria, os níveis de detalhamento são, sem dúvida, o item de maior subjetividade a ser discutido. Em geral o nível de detalhamento de um mapa está sob a inteira jurisdição do responsável pelo mapeamento que poderá, literalmente, julgar qual o nível de detalhamento que o seu trabalho teve. Esta situação indesejável não pode ser facilmente contornada, já que a manipulação da informação pode alterar profundamente os aspectos referentes a esse assunto. Logicamente, isso não se trata de um pré-julgamento mas, simplesmente, da análise de uma possibilidade plausível.

Sendo assim, para evitar a possível manipulação e diminuir a subjetividade do ato de conferir um nível de detalhamento a uma topografia, uma forma mais "matemática" de definir o nível de detalhamento pode ser usada, utilizando o conceito de densidade de pontos topografados (dpt), ou seja, a quantidade de bases topográficas por m², na área de uma cavidade natural.

Para se calcular a área da cavidade pode se usar o método de confeccionar o mapa da referida caverna em papel milimetrado, em uma escala que permita a contagem dos milímetros quadrados, passando o resultado para a escala real e, então, dividindo o número total de bases pela área da cavidade.

Na Tabela 4 estão colocados os níveis de detalhamento com seus respectivos dpt.

É lógico que este método também pode ser manipulado e influenciado pela colocação de bases aleatórias, mas, pelo menos, não está sujeito única e exclusivamente à vontade e desejo do topógrafo que, atualmente pode escolher o nível de detalhamento que quiser, ou, pior ainda, ficar indeciso, sem a necessária certeza para escolher o nível correto.

Um raciocínio simples nos leva a concluir que qualquer combinação de nível de detalhamento e de acurácia é possível, tendo em vista que eles são definidos em função de parâmetros distintos um do outro, não havendo interdependência.

Tabela 1 - Instrumentos de medição e seus limites de precisão associados.

Instrumento		Theo 010	Theo 020	Bus. Bruton	Bus. Zeiss	Trena
Limite de Precisão	L	0.5	0.5	--	--	0.5
	A	0.5	30	1800	1800	--

L= linear (cm) A=angular (segundos)



Tabela 2 – Erro Operacional Médio.

Theo 010	Theo 020	Habilidade	Bússola
0°06'	0°08'	0°35'	1°10'

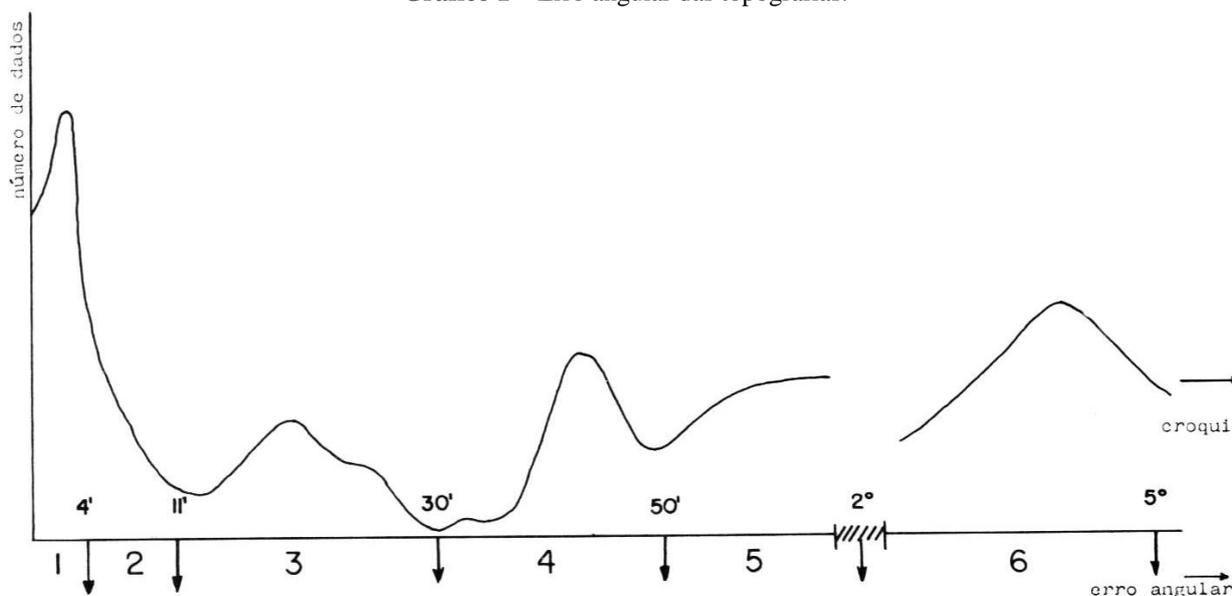
Tabela 3 – Nível de acurácia.

Níveis	Erro Angular	Erro Linear	Instrumento/ condição de mapeam.	Aplicação do Mapa
1	<0°04'	0,1%	Erro instr. 2' Teodolito Ótimas condições	Todo e qualquer estudo espeleocientífico de detalhe.
2	0°04' e 0°11'	0,3%	Erro instr. 10' Teodolito Boas condições	Todo e qualquer estudo espeleocientífico de detalhe.
3	0°11' e 0°30'	0,8%	Erro instr. 20' Teodolito/Habilidade Más condições	Não se presta ao levantamento espelegenético detalhado, nem à confecção de mapas isotores, variações comportamentais, etc.
4	0°30' e 0°50'	1,3%	Erro instr. 40' Habilidade/Bússola Ótimas condições	Levantamento preliminar para aproveitamento turístico, estudos bioespeleológicos e espeleomorfológicos.
5	0°50' e 2°	2,2%	Erro instr. 1° Bússola Boas condições	Guia para direcionamento, estudo bioespeleológico simplificado, e anotações de detalhes.
6	2° e 5°	3,6%	Erro instr. 4° Bússola Más condições	Guia simplificado, trabalho de exploração e reconhecimento.
	>5°		CROQUI	Idéia geral da caverna.

Tabela 4 – Níveis de Detalhamento.

	A	B	C	D	E
dpt	> 0,1	0,1 – 0,04	0,04 – 0,01	0,01 – 0,005	< 0,005
característica	1 base ou mais a cada 10m ²	1 base à cada 25m ² até menos de uma base a cada 10m ²	1 base à cada 100m ² até menos de uma base a cada 25m ²	1 base à cada 200m ² até menos de uma base a cada 100m ²	Menos de 1 base a cada 200m ²

Gráfico 1 – Erro angular das topografias.



Os números de 1 a 6 representam as populações encontradas estatisticamente dentro da população amostrada.

As setas indicam as divisões dos níveis.

Obs. O gráfico foi cortado na altura do 2° por questão de escala