

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**

Loreta Wenzel

**Reconhecimento e contagem de camadas de crescimento
de estalagmites utilizando Canny Edge Detection**

São Paulo

2023

Loreta Wenzel

Reconhecimento e contagem de camadas de crescimento de estalagmites utilizando Canny Edge Detection

Trabalho de Graduação Integrado (TGI)
apresentado ao Departamento de Geografia
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências
Humanas, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Paul Pérez
Machado

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

W482r Wenzel, Loreta
Reconhecimento e contagem de camadas de
crescimento de estalagmites utilizando Canny Edge
Detection / Loreta Wenzel; orientador Reinaldo
Machado - São Paulo, 2023.
48 f.

TGI (Trabalho de Graduação Individual)- Faculdade
de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da
Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia.

1. Estalagmite. 2. Canny Edge. 3. Espeleotema. 4.
Detecção de aresta. 5. Cárste. I. Machado, Reinaldo,
orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores que tive a oportunidade de conhecer durante minha trajetória. Agradeço a minha família e amigos por todo suporte e carinho.

Agradeço especialmente minha mãe por todos os ensinamentos e por estar sempre comigo, independente de qualquer coisa.

Agradeço ao meu parceiro de pesquisas, viagens, risadas e sonhos.

RESUMO

Wenzel, L. **Reconhecimento e contagem de camadas de crescimento de estalagmites utilizando Canny Edge Detection**. 2023. 48p. Trabalho de Graduação Integrado (TGI) - Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

A reconstrução cronológica dos espeleotemas permite a interpretação dos mesmos como registros paleoclimáticos. O objetivo do trabalho foi desenvolver um método computacional para a contagem de camadas de crescimento de espeleotemas do tipo estalagmites, considerando que pode auxiliar na precisão de análises com elementos radioativos, cosmogênicos e outras técnicas de datação utilizadas. Para isso foram aplicados algoritmos de detecção de arestas, Canny Edge, contagem de arestas e busca dos melhores parâmetros para a detecção em imagens escaneadas e recortadas da estalagmite DBE4 nas qualidades 1600dpi, 900dpi e 300dpi. Para os sets de imagens de 1600dpi os resultados foram de 56% considerando duas camadas a mais ou a menos; para 900dpi, considerando duas camadas também, 75%; para 300dpi, 18% considerando a mesma variação. Os resultados obtidos não foram totalmente satisfatórios, visto que apresentam erros consideráveis, indicando que métodos envolvendo inteligência artificial podem ser alternativas mais eficientes para o tema.

Palavras-chave: Estalagmites. Espeleotema. Canny Edge. Detecção de arestas.

ABSTRACT

Wenzel, L. **Recognizing and counting growing layers on stalagmites using Canny Edge Detection**. 2023. 48p. Integrated Graduation Paper - Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Cronological reconstruction of speleothems allows to interpret them as paleoclimatic records. The purpose of this research was to develop a computational method to count growing layers of stalagmites considering how that can help with improving dating technics analysis precision. It was elaborated and applied Algorithms of edge detection, such as Canny Edge, counting edge and search for better parameters to the detection in scanned and processed images of the stalagmite DBE4 in different resolutions. For the images datasets of 1600dpi the hit rates were up to 56% considering two layers variation, for 900dpi datasets it was 75% and 300dpi the rates were 18% considering the same variation. The results showed that artificial intelligence methods are more efficient alternatives to this problem.

Keywords: Stalagmites. Speleothem. Canny Edge. Edge Detection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema cárstico	23
Figura 2 – Esquema de nível de base	24
Figura 3 – Estrutura molecular de Calcita e Aragonita $CaCO_3$	25
Figura 4 – Formação de espeleotemas	26
Figura 5 – Fatores de determinação do $\delta^{18}O$ e $\delta^{12}C$	29
Figura 6 – Age depth model	31
Figura 7 – Hysteresis Thresholding	33
Figura 8 – Área da Serra da Bodoquena	35
Figura 9 – Estalagmite DBE4	36
Figura 10 – Entrada e saída para diferentes resoluções	42
Figura 11 – Gráfico de camadas x porcentagem de acerto para diferentes resoluções	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedade das imagens geradas nas diferentes resoluções	37
Tabela 2 – Melhores parâmetros e Mean Absolute Error (MAE)	41
Tabela 3 – Taxas de acerto considerando camadas a mais e a menos	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Pseudocódigo da aplicação de Canny Edge	38
Quadro 2 – Pseudocódigo do algoritmo de contagem de arestas	39
Quadro 3 – Pseudocódigo do algoritmo de melhores parâmetros	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivo	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.0.1	Terrenos Cársticos	23
2.0.2	Datação	26
2.0.3	Análises de isótopos estáveis	27
2.0.4	Camadas de crescimento	30
2.0.5	Detecção de arestas	31
2.0.5.1	Canny Edge Detector	32
3	METODOLOGIA	35
3.0.1	Materiais	35
3.0.1.1	Amostras	35
3.0.2	Método	37
3.0.2.1	Digitalização e pré processamento das imagens	37
3.0.2.2	Algoritmos	38
4	RESULTADO	41
4.0.1	Discussão	42
5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

O estudo de cavernas é muito importante para diversos fatores, dentre eles está a utilização de espeleotemas principalmente do tipo estalagmite como registros paleoclimáticos, que podem indicar períodos de enchentes e outros eventos extremos, mudanças climáticas e mudanças biológicas que ocorreram na Terra durante milhares de anos (WHITE; CULVER, 2012). São diversos métodos de datação e análises que podem ser feitos de acordo com a finalidade do estudo, dependendo dos materiais químicos presentes nas amostras e dos equipamentos disponíveis. O método mais preciso de datação atualmente é feito através dos isótopos radiogênicos Urânio e Tório e consegue datar aproximadamente até 600a (600.000 anos) com precisão (FAIRCHILD; BAKER, 2012). Como são análises feitas em poucos laboratórios no mundo, outros métodos mais comuns também são utilizados, por análises de outros elementos químicos (estáveis ou radioativos), métodos de comparação e outros.

Os espeleotemas do tipo estalagmite são registros muito valiosos porque podem manter um crescimento em camadas anuais, com possíveis hiatos, que podem ter datações e análises de acordo com a constância, ou inconstância, do crescimento de suas camadas (TAN *et al.*, 2006). Contudo, a contagem dessas camadas normalmente se dá a mão e é um processo muitas vezes demorado e exaustivo, além de que depende de uma leitura boa dos limites das camadas das amostras, que as vezes não são tão bem definidas. A combinação de métodos de datação com a contagem de camadas de crescimento de estalagmites permite uma reconstrução cronológica dos espeleotemas, muito utilizados para análises geomorfológicas e climáticas da região de origem da amostra ao longo do desenvolvimento da mesma. (BAKER *et al.*, 2008) Contudo, essas camadas são contadas à mão, gerando uma incerteza grande, ou a partir de métodos que utilizam lâminas para microscópio e destroem as amostras.

Nesse trabalho, é proposto um método para facilitar a contagem dessas camadas através da computação. A amostra da estalagmite DBE4 utilizada foi escaneada em alta, média e baixa resoluções (1600dpi, 900dpi e 300dpi) e nessas imagens foi aplicado o algoritmo de detecção de arestas Canny Edge Detector (CANNY, 1986), um dos mais utilizados na computação visual, e depois outro algoritmo que encontra os melhores parâmetros para o Canny Edge, com a intenção de detectar as camadas das amostras de maneira automática e contagem delas.

A importância do desenvolvimento de metodologias mais aprimoradas e que são confiáveis é para recriar paleoambientes de maneira mais precisa, assim possibilitando estudos das transformações geomorfológicas e climáticas ao longo da história, considerando a conservação dos registros o máximo possível.

O texto está dividido em fundamentação teórica, que explica o processo de formação das cavernas cársticas e de espeleotemas, os métodos de datação e análises de elementos para compreender o paleoclima, o processo de laminação de estalagmites e uma subseção sobre o algoritmo de detecção de aresta. Depois, são explicados os procedimentos metodológicos que estão divididos em uma breve descrição das amostras utilizadas e dos algoritmos aplicados. Além disso, a análise dos resultados obtidos para os diferentes data-sets criados, assim como possíveis melhorias para futuras pesquisas e as limitações para essa pesquisa.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver a partir de métodos computacionais uma maneira mais rápida de identificar e contar camadas de crescimento de espeleotemas do tipo estalagmites de cavernas cársticas para facilitar a análise de reconstruções cronológicas feitas a partir de diversos métodos de datação. Buscando analisar se os métodos computacionais realmente permitem de maneira mais eficiente o reconhecimento e contagem de camadas de crescimento de estalagmites e de preservação desses registros paleoclimáticos e paleoambientais.

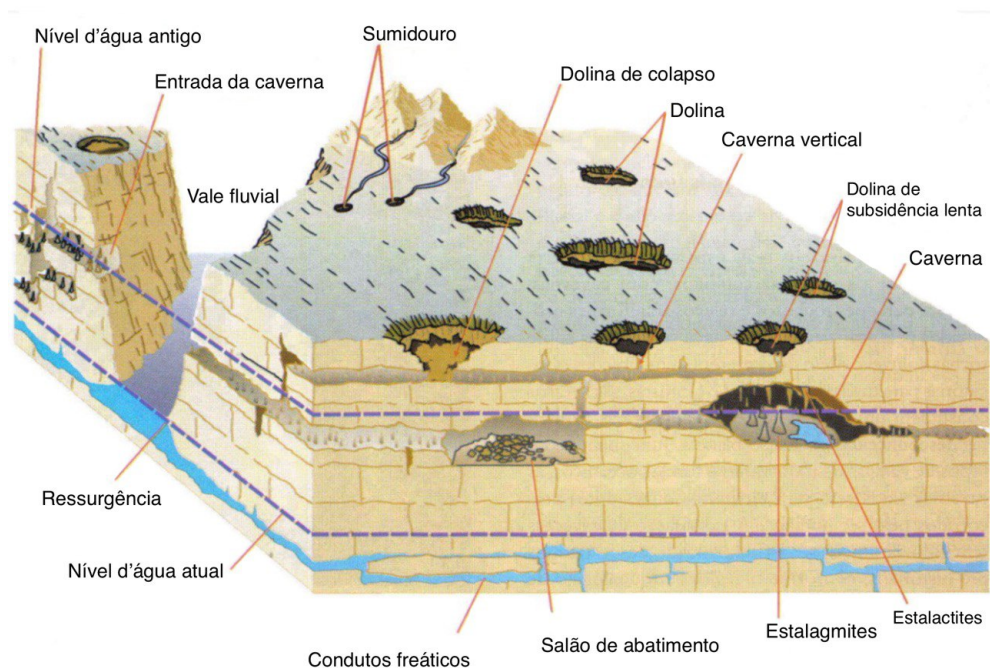
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.0.1 Terrenos Cársticos

O Carste é um tipo de relevo em que predomina a dissolução de rochas carbonáticas por processos químicos da interação da água meteórica com alta concentração de ácido carbônico que adentra através dos planos de acamamento e fraturas das rochas. A dissolução da rocha ocasiona na abertura e alargamento de feições como condutos, fendas, dolinas, sumidouros, e as cavernas, que são denominadas de porosidades terciárias (FORD; WILLIAMS, 2007).

Diversos fatores podem condicionar a origem e a morfologia dessas feições de alargamento da rocha carbonática, dentre eles, a disposição estratigráfica das formações, estruturas sedimentares e a tectônica da região. (PALMER, 1991) descreve padrões geomorfológicos de cavernas de acordo com as condições de recarga e porosidade das rochas. Os ciclos biogeoquímico de carbono e hidrológico locais são importantes para compreender a paisagem cárstica, são condicionados também pelo clima e, analisando variáveis ligadas a esses fatores, é possível recriar as condições climáticas da Terra ao longo de muitos anos. Na Figura 1, um esquema de sistema cársticos, com características desse tipo de paisagem.

Figura 1 – Sistema cárstico

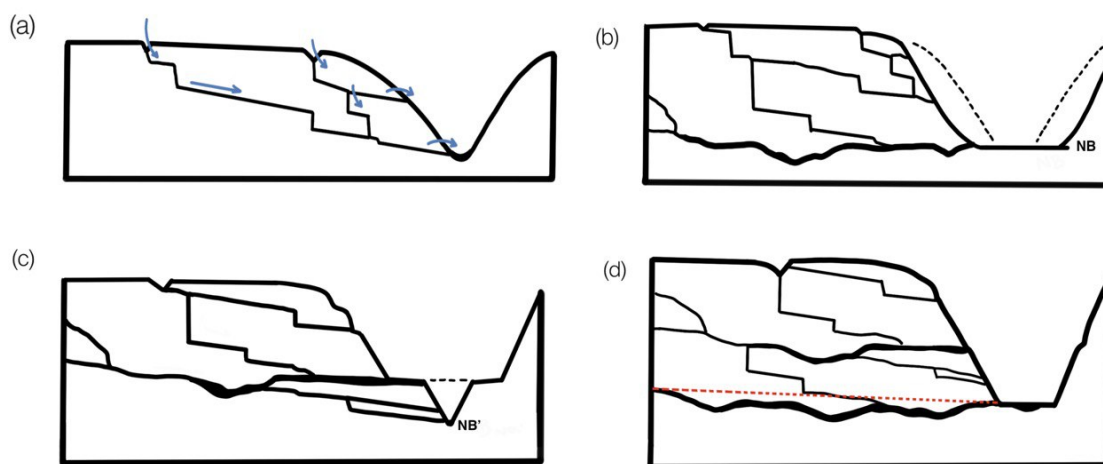


Principais componentes do sistema cárstico. Fonte:(KARMANN, 2000)

A hidrologia e o relevo influenciam diretamente na posição da zona freática e no gradiente hidráulico, fatores importantes para a determinação de condutos dentro da região de uma bacia hidrográfica (WHITE; CULVER, 2012). As cavernas podem ser consideradas como afluentes subterrâneos do rio principal de uma região, em que ocorre a recarga hídrica subsuperficial nas áreas de altitude mais elevadas, como o topo de um morro, e esse fluxo de água que adentra na rocha percola por determinadas distâncias até descarregar no principal rio em superfície.

O nível de base (NB) para um rio que deságua no mar é o próprio mar, e para os afluentes desse rio é o próprio rio, ou seja, existem diversos níveis de base locais dentro de uma bacia hidrográfica e o NB do mar ou de outra bacia - caso o rio principal deságue em um rio de outra bacia hidrográfica (WHITE; CULVER, 2012). Se esse rio principal está estabilizado, as encostas do vale em que passa tendem a retrair lateralmente, erodir, porém se o NB muda - como consequência de condições climáticas e/ou de soerguimento tectônico, aumentando o desnível e o gradiente do relevo -, as cavernas que estavam em estabilidade buscam equilíbrio com o novo NB. Nesse processo de decaimento do nível freático, condutos antes saturados de água são abandonados e novos condutos são criados (WHITE; CULVER, 2012). Essa área da caverna que se encontra acima do nível freático representa a trajetória antiga de fluxo de água e é denominada de zona vadosa. A Figura 2 apresenta quatro momentos da mudança do NB de um rio em superfície e como os condutos acompanham esse processo.

Figura 2 – Esquema de nível de base



(a) Recarga, fluxo e descarga de água em um rio em superfície. (b) retração lateral das encostas do vale quando o nível de base NB está estável. (c) Novo nível de base NB'. (d) Conduitos e cavernas na zona vadosa representada acima da linha tracejada. Fonte: imagem modificada de (PALMER, 2007)

A saturação da água em carbonato de cálcio é controlada principalmente pela origem da água. A infiltração de recarga pode ser difusa ou concentrada. (RUNKEL *et al.*,

2003) Águas pluviométricas alóctones ao sistema têm maior poder de dissolução do calcário por serem menos saturadas quando entram em contato com o carste, enquanto autóctones ao sistema saturam-se mais rapidamente, limitando a capacidade de dissolução ao infiltrar-se nas rochas. Dentro dessas porosidades terciárias ocorrem depósitos que podem ser de sedimentos clásticos, orgânicos e químicos, como por ações mecânicas de transporte fluvial, por desabamento, por precipitação de calcita e aragonita (FORD; WILLIAMS, 2007). Os depósitos de minerais secundários no interior dos condutos, denominados espeleotemas, acontecem a partir da água saturada em íons de cálcio que quando exposta à atmosfera da caverna perde CO_2 por troca gasosa, processo de desgaseificação, e esses íons livres no meio aquoso voltam a cristalizar como carbonato de cálcio $CaCO_3$ (calcita ou aragonita, Fig. 3). A equação química simplificada que representa os processos de dissolução e precipitação do carbonato de cálcio é:

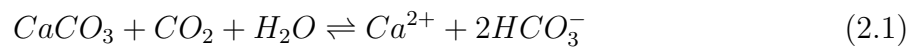
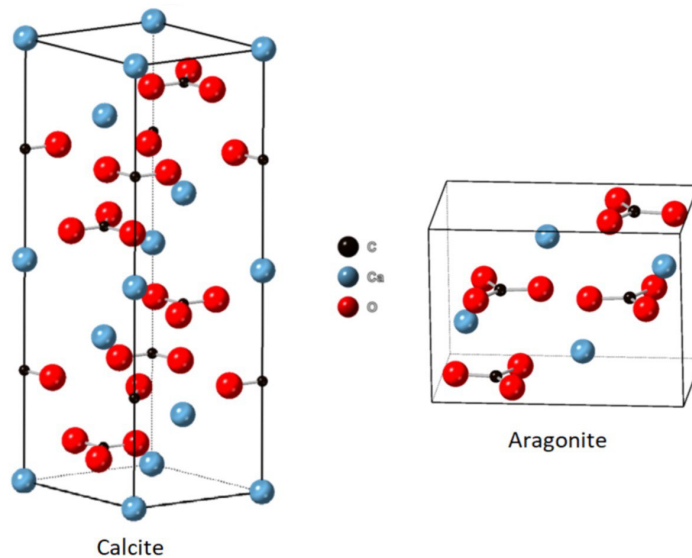


Figura 3 – Estrutura molecular de Calcita e Aragonita $CaCO_3$



À esquerda, estrutura molecular de Calcita; à direita, estrutura de Aragonita. Carbono (C) representado pelas esferas pretas; Cálcio (Ca), pelas esferas azuis e o Oxigênio (O) representado pelas esferas vermelhas. Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Calcite2BAragonite.png>

Com o gotejamento constante da água pelas fraturas no teto do interior da caverna em áreas não submersas, a cristalização do mineral se dá ao redor da gota de água mantendo ao mesmo tempo um canal aberto do gotejamento e o espessamento lateral e alongamento desse depósito, tomando a forma de um canudo que cresce de maneira descendente na caverna, esse tipo de espeleotema chama-se estalactite (FAIRCHILD; BAKER, 2012). Outro tipo de depósito de mineral secundário muito comum no interior das cavernas são as estalagmites, formadas também pelo gotejamento constante da água saturada, porém

à solução carbonática mantêm a declinação e inclinação magnética do seu período de deposição em minerais magnéticos (CRUZ *et al.*, 2021). Em (FORD; WILLIAMS, 2007), são descritos diversos métodos de datação, dentre eles utilizando isótopos cosmogênicos - formados na interação de radiação cósmica com elementos presentes na atmosfera e até determinada parte da crosta terrestre -, podendo datar em torno de 50a com AMS (Accelerator Mass Spectrometry) para contagem atômica de pequenas amostras dos espeleotemas. Os principais elementos usados são ^{14}C , ^{10}B , ^{26}Al e ^{36}Cl , apesar de que algumas limitações do método requerem cuidado com a análise dos resultados gerados.

Outros métodos são Ressonância de Spin Eletrônica (ESR), termoluminescência e luminescência opticamente estimulada que baseiam-se na estrutura de armadilha de um sólido exposto à radiação ionizante, em que o elétron - na camada de condução - ou o espaços - na camada de valência - são mantidos intactos por conta de defeitos e/ou impurezas que afetam o espaçamento atômico desse material (normalmente isolantes ou semicondutores)(FAIRCHILD; BAKER, 2012). Assim, com ressonância de spin eletrônico ou estímulos de energia térmica ou luminosa nesse material, consegue-se emitir sinais proporcionais ao da dose acumulada e ambiental.

O método atualmente mais preciso consegue datar elementos radioativos presentes nos espeleotemas - que contenham concentrações suficientes desses elementos, e esses espeleotemas não tenham sido recristalizados - devido ao maior tempo de decaimento da meia-vida de radioisótopos, chegando a uma previsão aproximada de até 600a. Os isótopos radioativos utilizados são principalmente de ^{238}U e ^{235}U , além de ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra e ^{231}Pa , ^{206}Pb e ^{207}Pb . O urânio é precipitado junto à calcita quando levado como íons de $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ e $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ em solução nas águas saturadas em carbonato de cálcio(FAIRCHILD; BAKER, 2012). No caso de ^{230}Th e ^{231}Pa , como são insolúveis, são depositados junto a detritos e argilas ao invés de precipitados como o urânio, fator muito importante pois utiliza-se espectrometria de massa para a contagem dos radioisótopos e o decaimento do excesso de ^{234}U para ^{230}Th em comparação com ^{238}U . Assim, espeleotemas que contém depósitos de argilas e detritos não são ideais para essa datação.

2.0.3 Análises de isótopos estáveis

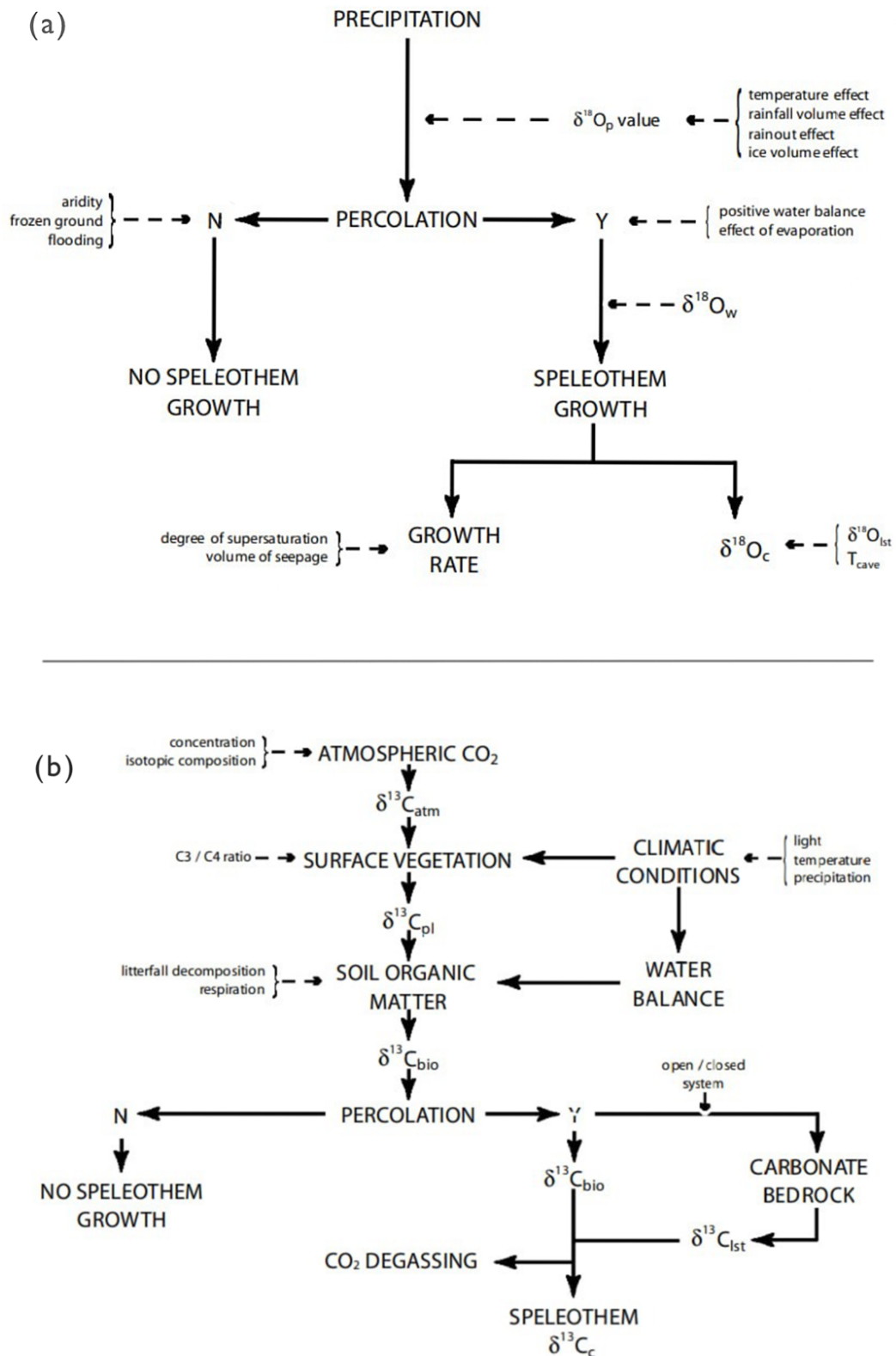
A análise dos elementos estáveis principalmente de ^{18}O e ^{16}O , ^{12}C e ^{13}C como proxies que representam variáveis ambientais também é utilizada, levando em conta os processos de fracionamento pelos quais passam. Esses registros paleoambientais terrestres complementam estudos de registros polares e marinhos a partir dos dados de testemunhos de gelo e da calcita de foraminíferas, apesar de apresentarem algumas limitações (FAIRCHILD; BAKER, 2012). Como o ambiente de cavernas tem estabilidade considerável, os espeleotemas refletem médias anuais de temperaturas externas, podendo apresentar mudanças de acordo com sua localização dentro da caverna.

O fracionamento dos isótopos de carbono não ocorre de maneira tão fácil como para o oxigênio, porque o carbono se encontra no centro dos grupos de CO_3 na calcita e aragonita (Fig. 3), assim mais estudos focam nos dados de oxigênio. O oxigênio tem três principais isótopos, ^{16}O , ^{17}O e ^{18}O que contém 8 prótons cada, porém números diferentes de nêutrons (8, 9 e 10 respectivamente) e assim diferentes massas, permitindo diversos processos ambientais de fracionamento desses isótopos. Para o carbono, os isótopos ^{12}C , ^{13}C e ^{14}C contém 6 prótons cada - e 6, 7 e 8 nêutrons respectivamente. Quanto mais pesados os isótopos, são mais facilmente retidos e concentrados em sua fase mais densa. (LACHNIET, 2009) Os isótopos de ^{16}O são mais abundantes na natureza em relação aos isótopos de ^{18}O assim como os de ^{12}C quanto aos isótopos de ^{13}C . São utilizados padrões de referência de um fóssil de *Belemnitella americana* VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite) para calcita e VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) para a composição isotópica da água. A abundância relativa dos isótopos entre amostras e referências é dada pelas expressões denotadas por delta (δ) em partes por mil (‰) :

$$\delta^{18}O = \left(\frac{\frac{^{18}O}{^{16}O_{sample}} - \frac{^{18}O}{^{16}O_{standard}}}{\frac{^{18}O}{^{16}O_{standard}}} \right) \cdot 1000 \quad (2.2)$$

$$\delta^{13}C = \left(\frac{\frac{^{13}C}{^{12}C_{sample}} - \frac{^{13}C}{^{12}C_{standard}}}{\frac{^{13}C}{^{12}C_{standard}}} \right) \cdot 1000 \quad (2.3)$$

Os isótopos de oxigênio tem relação direta com o ciclo hidrológico, desde a composição da água dos oceanos, processos de evaporação e precipitação, recarga de água no solo até a água de gotejamento na deposição da calcita. São vários os processos de fracionamento que influenciam no $\delta^{18}O$, podendo ser de equilíbrio ou cinético. As variações de $\delta^{13}C$ podem ser interpretadas de diversas maneiras, são resultados de modificações da composição isotópica de CO_2 na atmosfera, de processos biogênicos de CO_2 do solo e vegetação, degasificação de CO_2 e outras variáveis (NOVELLO *et al.*, 2021). Na Figura 5(a), é mostrado um esquema de alguns fatores determinantes no ciclo hidrológico para o $\delta^{18}O$ na composição dos espeleotemas de calcita e na Figura 5(b), um esquema dos fatores determinantes para a composição de $\delta^{13}C$ nos espeleotemas.

Figura 5 – Fatores de determinação do $\delta^{18}O$ e $\delta^{12}C$ 

(a) Composição de $\delta^{18}O$ nos espeleotemas sob condições de equilíbrio. (b) Composição de $\delta^{13}C$ nos espeleotemas sob condições de equilíbrio. Fonte: (WILLIAMS *et al.*, 2004)

2.0.4 Camadas de crescimento

Camadas de crescimento estão presentes em diversos materiais geológicos e biológicos como recifes de corais, anéis de árvores, testemunhos de gelo, estalagmites (Fig. 9), entre outros. São normalmente suscetíveis às condições de seus ambientes, processos cuja escala temporal pode ser anual, sub-anual ou supra-anual (TAN *et al.*, 2006). A ocorrência de camadas anuais em espeleotemas é devido às variações climáticas sazonais da superfície, como temperatura e concentração de CO_2 no solo, que tem relação direta com as variações químicas da água de gotejamento e as condições atmosféricas das cavernas.

As regiões com variações climáticas de processos anuais mais significantes tem mais chances de afetar a formação dos espeleotemas e pode ter uma frequência de camadas anuais neles maior também, mas não necessariamente. Hiatos podem ocorrer no crescimento dos espeleotemas por diversos fatores, como com a mudança na saturação da água de gotejamento ou interrupção da mesma, eventos extremos como inundações (DASGUPTA *et al.*, 2010) e outros processos que influenciam o desenvolvimento do espeleotema.

A contagem de camadas normalmente é feita através de técnicas microscópicas como a estimulação por fluorescência UV (BAKER *et al.*, 2008) e petrografia ou pela examinação direta opticamente das camadas visíveis. Dependem de demonstrações bem fundamentadas do crescimento contínuo dessas camadas e do processo de contagem e medição da espessura em relação com informações climáticas, apesar desse ser limitado pela demora da construção cronológica e subjetividade da contagem das camadas. Assim, é necessário de atenção na análise de periodicidade dos espeleotemas. Além disso, não são práticos para espeleotemas grandes e, no caso de utilizar lâminas para observação das camadas, destroem por completo as estalagmites.

Os componentes determinísticos que podem ser extraídos para as análises de séries temporais levam em consideração o comportamento periódico e a autocorrelação estatística de variáveis. O crescimento do espeleotema no tempo é representado pelos modelos de *Age-depth*, no caso das estalagmites *Age-distance*, que leva em consideração as determinações radiométricas das idades feitas e os intervalos entre elas ao longo dos eventos (Fig. 6), atentando para as possíveis irregularidades, assim as vezes necessitando de métodos estatísticos não lineares para correlacionar esses fatores. [citar] Uma construção cronológica precisa do desenvolvimento do espeleotema é possível através da combinação de métodos de datação como $U - Th$ e $U - Pb$ com as contagens de camadas para datar o intervalo entre as datas adquiridas, nesse caso permitindo determinar a variação de $^{230}Th/^{232}Th$ e também a redução da incerteza dada na datação (FAIRCHILD; BAKER, 2012).

Figura 6 – Age depth model

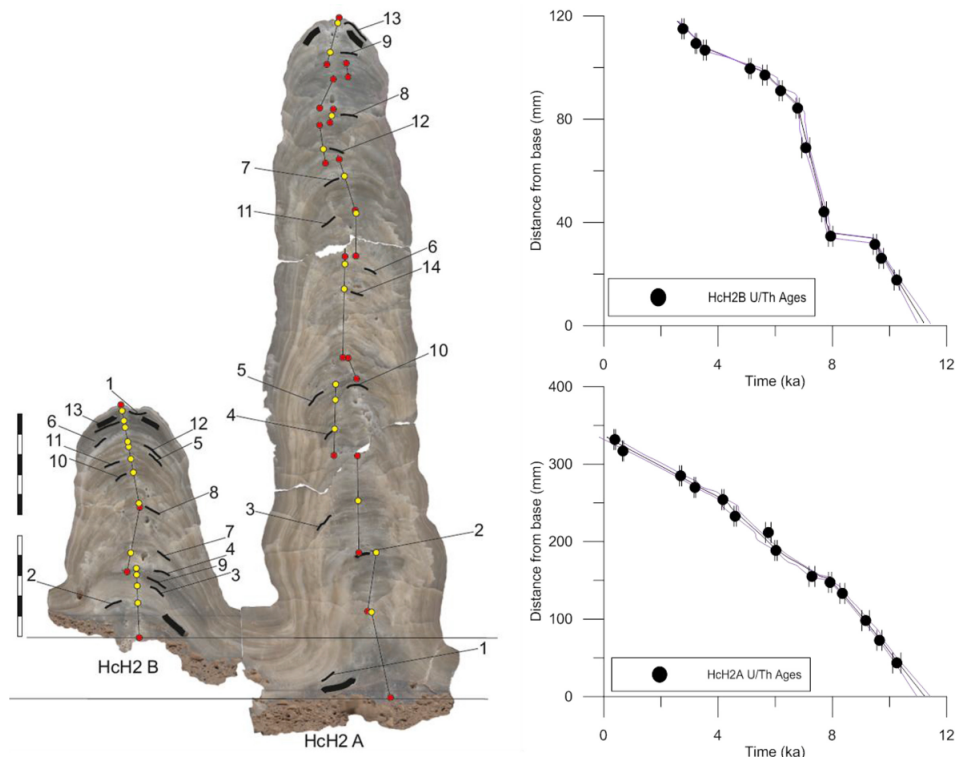


Imagem das estalagmites HcH2A e HcH2B, Eslováquia, com marcações que indicam o local das amostras retiradas para datação por U-Th. Ao lado, os modelos de idade de acordo com a datação e a distância da base para as duas estalagmites, em que os pontos representam o valor datado com duas barras de erro e a linha principal representa a média de idade contando com outras duas linhas que representam o valor de incerteza (2σ) para a cronologia.

Fonte: (BENSON *et al.*, 2018)

A contagem das camadas de espeleotemas de forma automatizada já foi abordada por alguns autores como (SMITH *et al.*, 2009) e (MEYER; FABER; SPÖTL, 2006), dado a falta de praticidade e de precisão dessa contagem manual. Além disso, a construção cronológica dos espeleotemas a partir dos métodos de datação e os intervalos entre eles representa atualmente os métodos mais precisos para a reconstrução paleoclimática (FAIRCHILD; BAKER, 2012), assim melhorando a qualidade da contagem de camadas é possível obter análises melhores fundamentadas. Para a construção da cronologia dos espeleotemas, o algoritmo StalAge (SCHOLZ; HOFFMANN, 2011) é o principal modelo utilizado atualmente para montar modelos de idade-profundidade para análises de datação.

2.0.5 Detecção de arestas

A detecção de arestas é um método muito utilizado na computação para extrair informações de imagens, desempenha um papel importante nas áreas da saúde, climatologia, machine learning, arquitetura e muitas outras. Existem múltiplas aplicações, como a detecção de covid-19 em imagens de raio-X (HWA; BADE; HIJAZI, 2020), o aprimoramento

de análises de imagens de satélite (MAPURISA; SITHOLE, 2022), a reconstrução 3D de imagens (SU; JIA, 2015), a detecção de áreas no oceano com Deep Learning (FELT *et al.*, 2022), e muito além. Diversas técnicas foram desenvolvidas para conseguir detectar arestas em uma imagem, como filtro de Sobel, Canny Edge, Redes Neurais, entre outras.

Nas estalagmites, a detecção de aresta pode ser utilizada para extrair as informações de arestas de imagens deles, considerando as camadas de crescimento como as arestas a serem detectadas em uma imagem da estalagmite. Dessa maneira, facilitando e assegurando a contagem e identificação de camadas entre datações, para facilitar a análise das taxas de crescimento do espeleotema.

2.0.5.1 Canny Edge Detector

O detector de arestas desenvolvido por John Canny (CANNY, 1986), que propôs uma maneira de utilizar as propriedades do operador Laplaciano de Gradiente. O Canny Edge Detector é um dos detectores de arestas mais usados e opera a partir de alguns passos. Primeiro, é necessário converter a imagem para a escala de cinza e aplicar um desfoque gaussiano (Gaussian blur). Depois é aplicado o operador de Sobel para conseguir as direções X e Y e calcular a intensidade e orientação dos vetores de um gradiente. Assim, é analisado cada pixel e determinado quais manter e quais descartar a partir de um operador de limiar de histeresis (hysteresis thresholding).

Primeiro, a imagem I em tons de cinza, representada por uma matriz de $M_{i \times j}$ é suavizada a partir do filtro Gaussiano n_σ em que o $*$ denota a convolução. Essa etapa é importante para garantir que ruídos não sejam levados em consideração na detecção.

$$I_2 = n_\sigma * I \quad (2.4)$$

Em que o filtro gaussiano de tamanho $(2k + 1) \times (2k + 1)$ é dado por:

$$n_\sigma = \frac{1}{e\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(i - (k + 1))^2 + (j - (k + 1))^2}{2\sigma^2}\right); 1 \leq i, j \leq (2k + 1) \quad (2.5)$$

Então é aplicado o operador de Sobel na imagem suavizada, esse filtro detecta as bordas na vertical e horizontal. Nessa etapa são utilizadas duas matrizes que são convolucionadas com a imagem suavizada. Essas matrizes aproximam a derivada dos eixos x e y da matriz, dando uma noção do gradiente laplaciano.

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * I_2 \quad (2.6)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * I_2 \quad (2.7)$$

Em que G_x é a aproximação da primeira derivada em relação a x e G_y é a primeira derivada em relação a y. A partir disso, é possível definir a magnitude desse gradiente em cada pixel denotada por:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2.8)$$

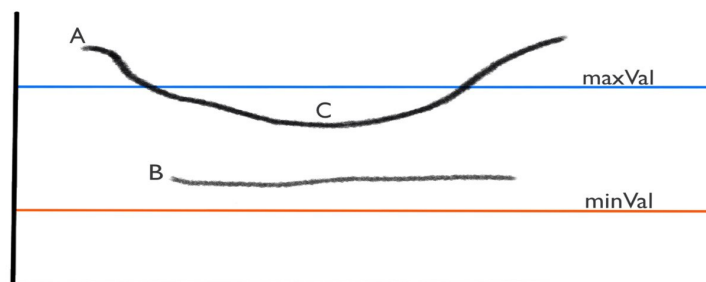
e sua direção por:

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (2.9)$$

Com essas informações é possível selecionar apenas as arestas que apresentam a maior intensidade, essa é uma etapa de pós processamento do algoritmo, com o intuito de reduzir o ruído que fica no filtro de Sobel.

O último passo é chamado de Hysteresis Thresholding, em que dois valores representam o limiar máximo e o mínimo considerando a intensidade do gradiente. Os pontos de arestas definidos que estão acima do valor máximo são considerados como parte da aresta e os valores abaixo do valor mínimo são descartados. Para os pontos cujos valores estão entre o máximo e o mínimo, aqueles cujo pixel faz fronteira com outro pixel que tenha sido considerado parte da aresta também é considerado como aresta, e aqueles que não apresentam conexão são descartados (Fig. 7).

Figura 7 – Hysteresis Thresholding



A: pontos acima da linha de valor máximo (maxVal) são consideradas como valores certos da aresta. B: pontos entre os valores máximo e mínimo (minVal) que não apresentam conexão com os pontos acima do maxVal são descartados. C: pontos entre maxVal e minVal que estão conectados a arestas acima do maxVal são consideradas como parte da aresta também. Fonte: (HWA; BADE; HIJAZI, 2020)

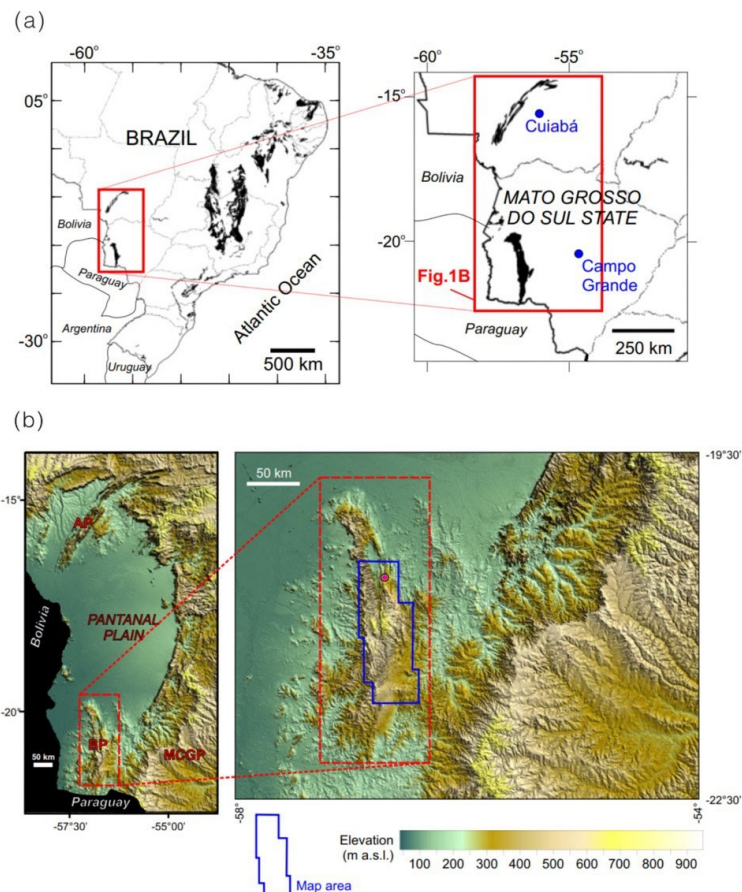
3 METODOLOGIA

3.0.1 Materiais

3.0.1.1 Amostras

A amostra de estalagmite utilizada faz parte da coleção do Laboratório de Terrenos Cársticos do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. A estalagmite DBE4 utilizada é parte da formação da Caverna Dona Benedita, localizada ao longo do carste da Serra da Bodoquena no Mato Grosso do Sul, Centro-Oeste brasileiro (Fig. 8). A área tem como característica rochas terrígenas e calcárias do período Neoproterozóico e Cambriano, do grupo Corumbá na Faixa Paraguai (BOGGIANI; FAIRCHILD; COIMBRA, 1993)

Figura 8 – Área da Serra da Bodoquena



(a) Mapa da área da Serra da Bodoquena, MS com as principais rochas carbonáticas do Brasil; (b) Modelo de elevação digital da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, 2006) da área da Serra da Bodoquena. O ponto em rosa representa a área da caverna Dona Benedita ($20^{\circ} 34' 12''\text{S}$, $56^{\circ} 43' 11.99''\text{W}$). Fonte: (KARMANN; SALLUN, 2007)

O clima da Serra da Bodoquena é úmido e tropical, com taxas médias de precipitação de 1,419mm por ano. É uma das áreas de carstes mais extensas do Brasil, um sistema de

plateaus e montanhas de aproximadamente 200km de extensão e 800m de elevação cercado pela planície do pantanal Mato-Grossense brasileiro (KARMANN; SALLUN, 2007).

A importância de utilizar espeleotemas que já foram estudados e coletados é compreender que são registros de paleoambientes que devem ser conservados ao máximo. Já foram feitos estudos de datação de espeleotemas da caverna Dona Benedita (JAQUETO *et al.*, 2022), a estalagmite DBE4 utilizada nessa pesquisa faz parte do conjunto de amostras das expedições na caverna Dona Benedita e compõem a coleção do laboratório de pesquisas de cavernas do Instituto de Geociências. As amostras são cortadas verticalmente com uma serra de diamante para evitar perdas do material e posteriormente polidas. Dentre essas amostras, a estalagmite DBE50 foi datada e analisada a partir de métodos de U-Th e estudos paleomagnéticos (JAQUETO *et al.*, 2022). A estalagmite DBE4 (Fig. 9) tem 216mm de altura e apresenta camadas de crescimento bem demarcadas.

Figura 9 – Estalagmite DBE4

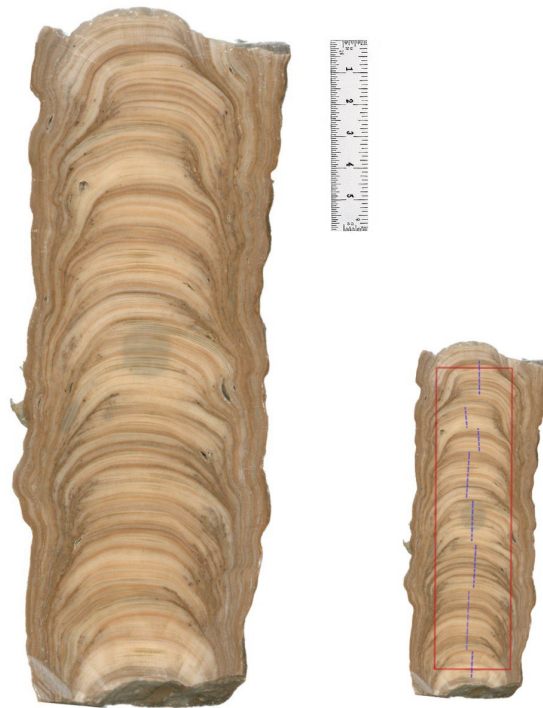


Imagem escaneada com Plustek Optipro A320L da estalagmite DBE4 parte da coleção de estalagmites da Caverna Dona Benedita do acervo do Laboratório de Terrenos Cársticos, IGC/USP. À direita, o retângulo em vermelho representa a área da estalagmite considerada para as imagens de entrada dos algoritmos, e tracejado azul representa a aproximação dos eixos de crescimento das camadas. Fonte: Imagem do próprio autor

3.0.2 Método

3.0.2.1 Digitalização e pré processamento das imagens

Para a digitalização em RGB do espeleotema DBE4 foi utilizado um scanner de alta resolução, Plustek Opticpro A320L de resolução máxima 1600dpi (pontos por polegada, *dots per inch*) disponibilizado pelo Laboratório de Terrenos Cársticos no Instituto de Geociências da USP. O espeleotema foi digitalizado ao lado de uma régua de 30cm em três definições: 1600dpi, 900dpi e 300dpi, afim de identificar a performance da detecção de arestas de acordo com diferentes qualidades de imagem. Os tamanhos dos arquivos .tiff foram de 41,330KB (Kilobyte), 11,734KB e 2,428KB, respectivamente, e a precisão das imagens foram de 0.018mm/px (pixel), 0,03mm/px e 0,1mm/px.

As imagens escaneadas foram recortadas em imagens menores considerando a área da amostra sem o fundo que foi escaneado junto, afim de facilitar a contagem e a anotação manual dos dados. Para o *scan* de 1600dpi, os recortes totalizaram em 588 imagens de 256x256 pixel, e representam aproximadamente 4.6mm do espeleotema contendo em média 10 camadas cada. Para os outros *scans* o recorte foi feito de maneira proporcional, assim as imagens geradas para 900dpi tem tamanho de 144x144 pixel, e representam aproximadamente 4.3mm do espeleotema. Para 300dpi o tamanho das imagens é de 48x48 pixel, aproximadamente 4.8mm da estalagmite (ver Tabela 1 para a relação de propriedades das imagens). A tentativa foi de manter um padrão para que todas as imagens representassem aproximadamente o mesmo tamanho, parte e quantidade de camadas no espeleotema, de forma que a anotação manual de um data-set pudesse servir de parâmetro para todas as qualidades.

Definições das imagens				
imagens geradas	resolução (dpi)	precisão (mm/px)	tamanho (px)	tamanho real (mm)
588	1600	0.018	256x256	4.6x4.6
588	900	0.03	144x144	4.3x4.3
588	300	0.1	48x48	4.8x4.8

Tabela 1 – Propriedade das imagens geradas nas diferentes resoluções

As imagens cujas camadas estavam mais paralelas ao eixo x foram escolhidas dentre os recortes gerados, uma vez que representam os recortes mais próximos do eixo de crescimento do espeleotema. Foram então contadas manualmente as camadas visíveis em cada imagem selecionada do grupo de recortes de 1600dpi e adicionadas em um arquivo .csv contendo a numeração da imagem e a quantidade de camadas identificadas, totalizando 60 imagens. Foram aplicados os algoritmos de detecção de arestas e contagem das arestas e a busca dos melhores parâmetros para a detecção das camadas nas imagens selecionadas para as três qualidades em 70% dos dados de cada conjuntos. Dessa forma foi possível obter a média dos melhores parâmetros, em que o desvio padrão era menor, e ao aplicar

esses parâmetros para os outros 30% dos dados anotados é possível visualizar a contagem de arestas pelo algoritmo em comparação com a contagem manual. A separação dos dados em treinamento e teste - 70% e 30% - possibilita ver a atuação do algoritmo para dados não anotados, ou seja, dados não processados pelo mesmo.

Os algoritmos foram escritos na linguagem de programação Python3.9.13, utilizando a biblioteca OpenCV (OPEN. . . , 2015) para aplicação do Canny Edge Detector. O código da pesquisa está disponível no repositório do GitHub de url <https://github.com/s2lola/speleothem>

3.0.2.2 Algoritmos

O Algoritmo 1, descrito no Quadro 1, recebe como entrada a imagem em que serão identificadas as camadas de crescimento da estalagmite e os valores dos parâmetros para o algoritmo de Canny Edge, e retorna uma imagem que representa as arestas detectadas. Na linha 1 a imagem é convertida para tons de cinza, pois recebe de entrada uma imagem com 3 canais, RGB, e na linha 2 é aplicado um borramento - como um filtro gaussiano - com a intenção de diminuir os ruídos da imagem. Na linha 3 é aplicado o algoritmo de Canny Edge e retornado o resultado.

Quadro 1 – Pseudocódigo da aplicação de Canny Edge

<p>Algoritmo 1: Canny: Contando a quantidade de arestas</p> <p>Entrada: A imagem a ser aplicada o Canny Edge e os valor de mín e máx para o algoritmo de Canny Edge;</p> <p>imagem \leftarrow imagem que queremos contar as arestas;</p> <p>mín \leftarrow valor mínimo de corte para o algoritmo de Canny Edge;</p> <p>máx \leftarrow valor máximo de corte para o algoritmo de Canny Edge;</p> <p>Resultado: imagem representando as arestas</p> <p>1 <i>imagem</i> \leftarrow <i>converte imagem para tons de cinza;</i></p> <p>2 <i>imagem</i> \leftarrow <i>aplica borramento;</i></p> <p>3 <i>imagem</i> \leftarrow <i>aplica o algoritmo de Canny Edge;</i></p> <p>4 return imagem</p>

O Algoritmo 2, descrito no Quadro 2, realiza a contagem de arestas que representam uma estimativa das camadas de crescimento do espeleotema. Recebe como entrada a imagem obtida pelo Algoritmo 1. Na linha 1 é inicializado um vetor de contagem, que armazena a contagem do eixo vertical da imagem, as linhas 5 e 6 representam a posição inicial de (x, y) da imagem.

Após inicializadas as variáveis, o algoritmo começa o processo de contagem das arestas da imagem. A quantidade de arestas detectadas para cada eixo vertical da imagem é contada considerando que as camadas de crescimento se desenvolvem em um eixo horizontal de crescimento. Portanto na linha 7 é percorrido todo o eixo horizontal, em que o novo valor inicial de contagem para x é 0, definido na linha 8. Na linha 9 o eixo vertical é

percorrido contando a quantidade de arestas, dessa maneira é possível verificar se existe uma aresta na posição (x, y) da imagem, linha 10. Caso essa condição seja satisfeita, a aresta é contabilizada na linha 11. Depois de percorrer todo o eixo vertical da imagem é adicionado ao vetor contagem o valor da contagem daquele eixo na linha 15.

Após percorrer toda a imagem, retorna-se a média do vetor de contagem, que representa uma estimativa da quantidade de camadas presentes na imagem. Além disso, também é possível retornar o desvio padrão da contagem para saber se o algoritmo de Canny detectou muitos ruídos ou não. Usar uma imagem grande pode ser um problema para o algoritmo justamente por detectar muitos ruídos, prejudicando a contagem, assim o ideal é utilizar uma imagem que contenha somente o eixo de contagem do espeleotema.

Quadro 2 – Pseudocódigo do algoritmo de contagem de arestas

Algoritmo 2: ContaAresta: Contando a quantidade de arestas	
	Entrada: A imagem resultante da aplicação do Canny Edge; imagem \leftarrow imagem que deseja-se contar as arestas;
	Resultado: Quantidade de arestas
1	<i>vetor contagem</i> \leftarrow {};
2	$y \leftarrow 0$;
3	$x \leftarrow 0$;
4	while $x \neq$ tamanho eixo horizontal da imagem do
5	<i>contagem</i> $\leftarrow 0$;
6	while $y \neq$ tamanho eixo vertical da imagem do
7	if se tiver uma aresta na posição (x, y) da imagem then
8	<i>contagem</i> \leftarrow <i>contagem</i> + 1;
9	end
10	$y \leftarrow y + 1$
11	end
12	<i>vetor contagem</i> \leftarrow insere a contagem;
13	$x \leftarrow x + 1$
14	end
15	return média do <i>vetor contagem</i>

Os melhores parâmetros para o algoritmo de Canny podem ser definidos através da imagem em que saiba a quantidade de arestas, usando-a para encontrar o valor de mínimo e máximo do algoritmo. Essa imagem pode conter poucas camadas, entre 4 a 10. O Algoritmo 3 (Quadro 3) realiza a busca dos parâmetros, recebe a imagem cuja quantidade de arestas e o valor dessa quantidade já foi definido, e retorna os melhores parâmetros para o Canny Edge. Na linha 1 é inicializado o valor de erro em infinito, e nas linhas 2 e 3 os valores de mínimo e máximo dos parâmetros. As variáveis das linhas 4 e 5 são utilizadas para percorrer todos os valores de 0 até 255, nas linhas 6 e 7. A condição na linha 7 é utilizada para que o valor do mínimo não seja maior que o valor do máximo. Na linha 8 o Algoritmo 1 é aplicado e, na linha 9, o resultado no algoritmo 2. Após isso é possível

verificar o erro na linha 10, caso tenha um erro menor os parâmetros de (min, max) são atualizados, linhas 10-12. Após percorrer todos os possíveis valores de mínimo e máximo, o algoritmo retorna aqueles que representam o menor erro associado à contagem. Também pode-se modificar o Algoritmo 3 para verificar o menor desvio padrão e o erro.

Quadro 3 – Pseudocódigo do algoritmo de melhores parâmetros

Algoritmo 3: Encontrando os parâmetros para o Canny Edge	
	Entrada: Uma imagem que contenha os valores anotados de quantas arestas existem;
	imagem \leftarrow imagem de treinamento;
	arestas \leftarrow valor real de arestas na imagem;
	Resultado: Os melhores parâmetros para o Canny Edge
1	<i>erro</i> $\leftarrow \infty$;
2	<i>valor minimo</i> $\leftarrow 0$;
3	<i>valor maximo</i> $\leftarrow 0$;
4	<i>min</i> $\leftarrow 0$;
5	<i>max</i> $\leftarrow 0$;
6	while <i>max</i> $\neq 255$ do
7	while <i>min</i> \neq <i>max</i> do
8	<i>imagem canny</i> = <i>Canny(imagem, min, max)</i> ;
9	<i>contagem</i> \leftarrow <i>ContaAresta(imagem canny)</i> ;
10	if $ $ <i>arestas</i> - <i>contagem</i> $ <$ <i>erro</i> then
11	<i>erro</i> \leftarrow $ $ <i>arestas</i> - <i>contagem</i> $ $;
12	<i>valor minimo</i> \leftarrow <i>min</i> ;
13	<i>valor maximo</i> \leftarrow <i>max</i> ;
14	end
15	<i>min</i> \leftarrow <i>min</i> + 1
16	end
17	<i>max</i> \leftarrow <i>max</i> + 1
18	end
19	return <i>valor minimo, valor maximo</i>

Pode-se utilizar um algoritmo similar ao Algoritmo 3 para encontrar os melhores parâmetros para um banco de dados de imagem. A estrutura é a mesma porém é aplicado o Algoritmo 1 para todas as imagens do banco de dados usando os mesmos valores de máximo e mínimo, enquanto o erro pode ser estimado pelo erro médio absoluto entre o vetor de contagem e o vetor que contém os valores verdadeiros de camadas na imagens. Desse modo, seria possível utilizar os valores de máximo e mínimo encontrado por esse algoritmo para contar novas imagens de espeleotemas.

4 RESULTADO

O processo foi feito rodando o algoritmo para todas as imagens de acordo com o grupo de qualidade a qual pertencem e aplicado nas imagens de teste para conseguir o resultado do treinamento. Dessa forma, é possível ver alguns dados referentes ao acerto e erro do algoritmo de acordo com os dados anotados.

A aplicação para os dados de acordo com a qualidade das imagens teve resultados diferentes para cada conjunto. No caso do conjunto de 1600dpi, os resultados para melhores parâmetros foram de mínimo 0 e máximo 8, e o erro MAE (Mean Absolute Error) foi de 2.32 para o treinamento e de 2.37 para o teste. Para os dados de 900dpi, os valores de mínimo e máximo foram de 0 e 4, e o MAE de treinamento 1.81, enquanto o Mae de teste 1.72. Para os dados de 300dpi, o resultado foi de valores mínimo 0 e máximo 1, e o MAE de treinamento 5.22 e de teste 5.69. Na Tabela 2, pode-se compara os valores dos melhores parâmetros encontrados e os valores do MAE para os dados de treinamento e teste.

Qualidade (dpi)	Mín	Máx	MAE Treinamento	MAE Teste
1600	0	8	2.32	2.37
900	0	4	1.81	1.72
300	0	1	5.22	5.69

Tabela 2 – Melhores parâmetros e Mean Absolute Error (MAE)

Os resultados na Tabela 3 mostram a porcentagem de acerto da contagem para os dados de teste de acordo com os melhores parâmetros estabelecidos considerando de 0 até 4 camadas contabilizadas a mais ou a menos do que anotado, para as qualidades 1600dpi, 900dpi e 300dpi.

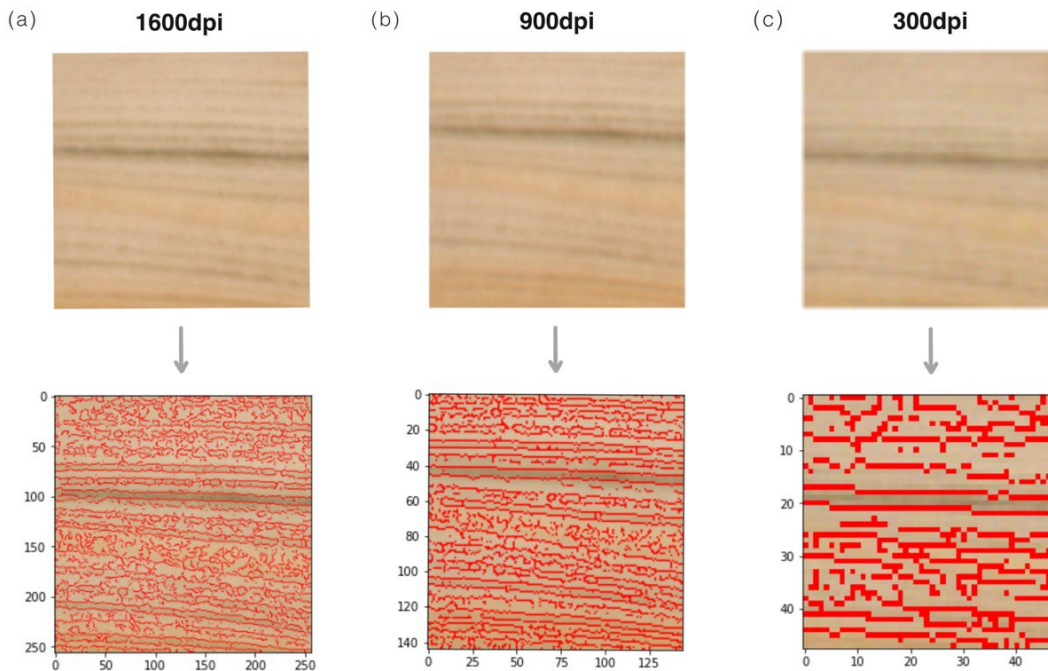
Qualidade (dpi)	Acerto	+/- 1	+/- 2	+/- 3	+/- 4
1600	18.75	25.0	56.25	75.0	87.5
900	25.0	25.0	75.0	81.25	100.0
300	6.25	12.5	18.75	25.0	25.0

Tabela 3 – Taxas de acerto considerando camadas a mais e a menos

Uma imagem aleatória foi escolhida para exemplificar e ver como o algoritmo atua. A imagem 65 teve uma anotação de 13 arestas visíveis na contagem manual para os dados de 1600dpi. Aplicando os melhores parâmetros encontrados para o conjunto de 1600dpi - mínimo 0 e máximo 8 - o algoritmo contabiliza apenas 12 camadas na imagem 65. Para os parâmetros encontrados para 900dpi - mínimo 0 e máximo 4 - a contagem retornada pelo algoritmo foi de 14.5 arestas. Para 300dpi - mínimo 0 e máximo 1 - o algoritmo detectou

apenas 6.5 arestas. A figura 10 representa os dados de entrada e saída para a imagem 65 nas diferentes resoluções.

Figura 10 – Entrada e saída para diferentes resoluções



A mesma imagem em três diferentes qualidades e as respectivas imagens com arestas detectadas de acordo com os melhores parâmetros encontrados para cada conjunto. (a) Entrada e saída para 1600dpi; (b) entrada e saída para 900dpi; entrada e saída para 300dpi.

Fonte: figura do autor

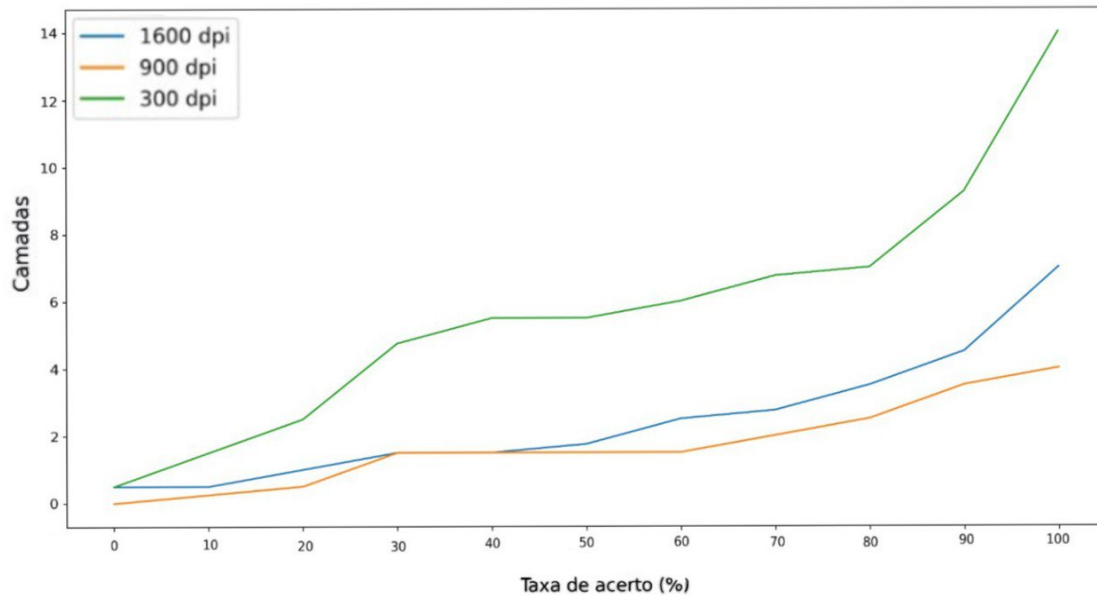
4.0.1 Discussão

Os resultados obtidos para as imagens de 1600dpi não foram tão bons, considerando uma variação até 2 camadas a mais ou a menos, o acerto é menor que 56.25%. Para 3 camadas de diferença, o acerto chega a 75% e para 4 camadas, 87.5% de acerto. Considerando que cada imagem tem em média 10 camadas visíveis, 4 camadas é quase metade desse valor, ou seja, são muitas camadas a serem desconsideradas pelo algoritmo. A quantidade de camadas consideradas a mais ou a menos e a porcentagem de acerto de acordo com a qualidade das imagens estão relacionadas no gráfico da Figura 11.

Para as imagens de 900dpi, os resultados foram melhor. O erro do treinamento foi de 1.81, menor do que para as imagens de treinamento de 1600dpi. E o erro médio absoluto do teste, para 900dpi, foi de 1.72, menor do que para o treinamento. A taxa de acerto foi de 25%, e considerando 1 camada a mais ou a menos manteve 25%, enquanto para 3 camadas os resultados sobem consideravelmente para 75% de acerto. Considerando 4 camadas a mais ou a menos a taxa de acerto foi de 100% para os dados de teste, a taxa mais precisa entre os resultados.

Nas imagens de 300dpi o resultado foi bem pior que para os outros conjuntos. Variando de 6.25% até 25% no máximo, que é um resultado bem baixo de acerto mesmo considerando camadas a mais e a menos.

Figura 11 – Gráfico de camadas x porcentagem de acerto para diferentes resoluções



No eixo x a porcentagem de acerto de acordo com a quantidade de camadas a mais ou a menos a serem consideradas (eixo y) para as diferentes resoluções - 1600dpi, 900dpi e 300dpi.

Fonte: figura do autor

Os resultados tiveram taxas de acerto bem baixas para o conjunto de 300dpi, nesse caso é perceptível para as imagens de entrada a diferença de camadas visíveis em outras resoluções por conta da qualidade dos dados de 300dpi, resultando na perda de muitas camadas no processo de digitalização do espeleotema.

Para as imagens de 1600dpi esperava-se um resultado possivelmente melhor, devido a qualidade da imagem e então o potencial de aparecerem as camadas menos perceptíveis e do algoritmo detectá-las. Apesar disso os resultados para imagens de qualidade 900dpi foram um pouco melhores. Uma possibilidade de isso ter ocorrido é porque nas anotações pode estar errada a contagem de camadas sutis que estão presentes em 1600dpi, outra coisa é que para 1600 dpi pode ter mais ruído sendo considerado/desconsiderado como aresta, interferindo no resultado. Além disso, como o banco de dados anotados é bem pequeno - 40 imagens de treinamento e 16 imagens de teste - a variação dos resultados é bem alta e irregular. Nesse caso, o próprio algoritmo não consegue fazer uma contagem adequada das camadas em comparação com outros métodos como utilizando inteligência artificial (SLIWINSKI; MANDL; STOLL, 2023).

A escolha de analisar os resultados para uma imagem aleatória é interessante

porque demonstra que algumas imagens tiveram um resultado bom de detecção, enquanto que em geral os resultados não foram tão bons. Com isso, também pode-se notar que o algoritmo varia muito e não mantém uma regularidade e precisão para diferentes dados. Por esse motivo também é importante a utilização de dados de treinamento e dados de teste, possibilitando uma análise do algoritmo para essas diferentes imagens em que não os dados anotados do teste não foram levados em conta para a identificação e contagem das camadas.

Outras abordagens metodológicas para esse problema que poderia melhorar bastante os resultados é desenvolver algoritmos de aprendizado de máquina. No artigo (SLIWINSKI; MANDL; STOLL, 2023), utilizando redes neurais profundas para a contagem de camadas em imagens de lâminas de estalagmites com microscopia confocal para estalagmites de crescimento entre 20 e $100\mu\text{m}/\text{yr}^{-1}$, os resultados tiveram uma precisão de 95% considerando uma camada a mais ou a menos.

5 CONCLUSÃO

O objetivo da pesquisa foi criar uma metodologia mais simples de contar camadas de crescimento de estalagmites a partir de métodos computacionais. O Canny Edge Detector é um algoritmo de detecção de arestas com uma performance boa e fundamentada, utilizado nos mais diversos campos. Considerando os resultados obtidos de testes dos algoritmos desenvolvidos, a precisão para a contagem não foi muito alta em comparação com trabalhos utilizando inteligência artificial. Possivelmente a imprecisão dos resultados está no algoritmo de contagem das arestas, que pode ser desenvolvido ainda mais. Contudo, apresenta um erro próximo ao erro da contagem manual que é feita das camadas de espeleotemas.

Outro desafio dentro do tema é a falta de um banco de dados anotados de imagens de espeleotemas, que é essencial para conseguir uma performance melhor do algoritmo. A pesquisa (SLIWINSKI; MANDL; STOLL, 2023) utilizando redes neurais para dados de luminescência confocal tem como base um banco de dados extenso e com uma preparação muito boa. Experimentos podem ser feitos também com redes neurais afim de desenvolver algoritmos baseados em bancos de dados para diferentes tipos de imagens de espeleotemas. Há diversas publicações relevantes que se propõem resolver questões similares como reconhecimento de ruas e construções (ETTEN, 2020) cuja arquitetura das redes pode conduzir métodos interessantes para a aplicação com espeleotemas.

A importância de um banco de dados bem estruturado é poder disponibilizar documentos que servirão como base para outras diversas pesquisas, especialmente com amostras que são de difícil acesso e precisam de cuidados específicos quanto a preservação paleoambiental. Bancos de dados abordando o tema de espeleotemas já foram desenvolvidos, o SISALv2 (AHMAD *et al.*, 2020) é um exemplo voltado para modelos cronológicos e registros isotópicos. Seria interessante utilizar dados do SISALv2 para testar a variação de modelos cronológicos com o método proposto nesta pesquisa, para confirmar se há mudanças significativas na precisão de análises das datações, porém não há imagens rotuladas de espeleotemas no banco. Assim, se faz necessário a criação de um banco de imagens anotadas para o desenvolvimento de pesquisas na área, especialmente utilizando métodos de Aprendizado de Máquina Supervisionado.

As principais limitações para esta pesquisa estão vinculadas ao acesso aos dados e amostras. Primeiro porque são amostras de registros importantíssimos, ou seja, devem ser conservadas ao máximo em seu ambiente. Além disso, as diversas técnicas de datação tem especificidades próprias que influenciam na qualidade dos resultados, deve-se considerar também o acesso a essas técnicas e como ficam os espeleotemas ao final do processo. Utilizar estalagmites datadas é importante para verificar se de fato a contagem automática das camadas de crescimento influenciam na precisão dos modelos cronológicos. Outro fator

também está relacionado às próprias limitações do algoritmo, considerando que a aplicação do Canny Edge resultou em detecções não muito boas para resoluções bem baixas - sendo necessário um instrumento de *scan* de alta qualidade. Além disso, os dados de saída são relativos a detecção e a contagem das arestas nas imagens, ou seja, não retorna também a espessura e cor das camadas, fatores que, com métodos de aprendizado profundo (*Deep Learning*), poderiam ser percebidos e contabilizados para uma reconstrução cronológica mais precisa. A importância desses dados analisados a partir de metodologias confiáveis é justamente para poder recriar paleoambientes de maneira mais precisa, assim possibilitando estudos das transformações geomorfológicas e climáticas ao longo da história.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, S. M. *et al.* Sisalv2: a comprehensive speleothem isotope database with multiple age–depth models. **Earth System Science Data**, v. 12, n. 4, p. 2579–2606, 2020. Disponível em: <https://essd.copernicus.org/articles/12/2579/2020/>.
- BAKER, A. *et al.* Annually laminated speleothems: a review. **International Journal of Speleology**, v. 37, 11 2008.
- BENSON, A. *et al.* Building robust age models for speleothems – a case-study using coeval twin stalagmites. **Quaternary Geochronology**, v. 43, p. 83–90, 2018. ISSN 1871-1014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871101417300705>.
- BOGGIANI, P.; FAIRCHILD, T.; COIMBRA, A. O grupo corumbá (neoproterozóico-cambriano) na região da serra da bodoquena (faixa paraguai), mato grosso do sul. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 23(3), p. 301–305, 1993. ISSN 0098-3004. Disponível em: <https://ppegio.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/11655>.
- CANNY, J. A computational approach to edge detection. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, PAMI-8, n. 6, p. 679–698, 1986.
- CRUZ, F. *et al.* Magnetic mineralogy of speleothems from tropical-subtropical sites of south america. **Frontiers in Earth Science**, April 2021.
- DASGUPTA, S. *et al.* Three thousand years of extreme rainfall events recorded in stalagmites from spring valley caverns, minnesota. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 300, n. 1, p. 46–54, 2010. ISSN 0012-821X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X10006072>.
- ETTEN, A. City-scale road extraction from satellite imagery v2: Road speeds and travel times. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, p. 1775–1784, mar 2020. Disponível em: <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/WACV45572.2020.9093593>.
- FAIRCHILD, I.; BAKER, A. **Speleothem science: From process to past environment**. Chichester: Wiley-Blackwell, 2012. 432 p.
- FELT, V. *et al.* Fast ocean front detection using deep learning edge detection models. **TechRxiv, IEEE Xplore**, 12 2022.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. Chichester: John Wiley I& Sons Ltd., 2007. 562 p.
- HWA, S.; BADE, A.; HIJAZI, M. Enhanced canny edge detection for covid-19 and pneumonia x-ray images. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 979, p. 012016, 11 2020.
- JAQUETO, P. *et al.* Stalagmite paleomagnetic record of a quiet mid-to-late holocene field activity in central south america. **Nature Communications**, v. 13, p. 1349, 03 2022.
- KARMANN, I. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. *In*: _____. [S.l.: s.n.]: Oficina de textos, 2000.

KARMANN, I.; SALLUN, W. Geomorphological map of the serra da bodoquena karst, west-central brazil. **Journal of Maps**, Taylor Francis, v. 3, n. 1, p. 282–295, 2007.

LACHNIET, M. Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values. **Quaternary Science Reviews**, March 2009.

MAPURISA, W.; SITHOLE, G. Improved edge detection for satellite images. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, V-2-2022, p. 185–192, 05 2022.

MEYER, M.; FABER, R.; SPÖTL, C. The wingeol lamination tool: new software for rapid, semi-automated analysis of laminated climate archives. **The Holocene**, v. 16, n. 5, p. 753–761, 2006.

NOVELLO, V. *et al.* Aplicação de isótopos estáveis de carbono no estudo das mudanças climáticas e ambientais. **Derbyana**, v. 42, 10 2021.

OPEN Source Computer Vision Library. 2015. <https://github.com/opencv>.

PALMER, A. Origin and morphology of limestone caves. **GSA Bulletin**, v. 103, 01 1991.

PALMER, A. **Cave Geology**. [*S.l.: s.n.*]: Cave Books, 2007. 454 p.

RUNKEL, A. *et al.* Hydrogeology of the paleozoic bedrock in southeastern minnesota. **Minnesota Geological Survey, Report of Investigations**, v. 61, 01 2003.

SCHOLZ, D.; HOFFMANN, D. Stalage – an algorithm designed for construction of speleothem age models. **Quaternary Geochronology**, v. 6, n. 3, p. 369–382, 2011. ISSN 1871-1014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871101411000094>.

SLIWINSKI, J.; MANDL, M.; STOLL, H. Machine learning application to layer counting in speleothems. **Computers Geosciences**, v. 171, p. 105287, 2023. ISSN 0098-3004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300422002369>.

SMITH, C. *et al.* Chronology building using objective identification of annual signals in trace element profiles of stalagmites. **Quaternary Geochronology**, v. 4, n. 1, p. 11–21, 2009. ISSN 1871-1014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871101408000381>.

SU, L.; JIA, F. A method for the 3d reconstruction based on edge detection and feature extraction. *In: _____*. [*S.l.: s.n.*], 2015. v. 8971, p. 35–45. ISBN 978-3-662-48246-9.

TAN, M. *et al.* Applications of stalagmite laminae to paleoclimate reconstructions: Comparison with dendrochronology/climatology. **Quaternary Science Reviews**, v. 25, n. 17, p. 2103–2117, 2006. ISSN 0277-3791. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0277379106000850>.

WHITE, W.; CULVER, D. **Encyclopedia of caves**. Amsterdam: Elsevier Inc., 2012. 945 p.

WILLIAMS, P. *et al.* Speleothem master chronologies: Combined holocene 18o and 13c records from the north island of new zealand and their palaeoenvironmental interpretation. **The Holocene**, v. 14, p. 194–208, 03 2004.