



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Carste em Rochas Não Carbonáticas: contribuição ao estudo geomorfológico em cavernas de arenito da Amazônia Paraense

Luciana Martins Freire¹, Joselito Santiago de Lima², Cesar Ulisses Vieira Veríssimo³, Edson Vicente da Silva⁴

Profa. da Faculdade de Geografia – Campus Ananindeua - Universidade Federal do Pará. E-mail: lucianamf@ufpa.br (autora correspondente) ¹. Prof. Campus Óbidos, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará. -mail: joselito.lima@ifpa.edu.br². Prof. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará (UFC). E-mail: verissimo@ufc.br³. Prof. Departamento de Geografia, Universidade Federal do Ceará. E-mail: cacau@ufc.br⁴.

Artigo recebido em 23/02/2017 e aceito em 16/10/2017

RESUMO

A Geomorfologia Cárstica é um ramo das geociências que se dedica a investigar a natureza, a morfogênese e a morfodinâmica das cavidades naturais subterrâneas, as quais incluem diferentes denominações como cavernas, grutas, abrigos, etc., além de entender suas feições relacionadas. O termo carste surgiu relacionado a rochas carbonáticas (calcários, dolomitas), porém existem também cavernas desenvolvidas em rochas siliciclásticas (arenitos, conglomerados, argilitos), metassedimentares (quartzito, formação ferrífera), ígneas (granito, basalto), dentre outras. Na região Amazônica, rica em feições geomorfológicas resultantes da interação sistêmica de elementos da natureza, ocorrem muitas cavernas em arenitos. Como exemplo, tem-se a Província Espeleológica Altamira-Itaituba (estado do Pará), situada na faixa de contato dos domínios geológicos da bacia sedimentar do Amazonas e do embasamento cristalino do complexo Xingu. Nesse sentido, o estudo proposto, com base na análise geossistêmica da paisagem, apresenta uma ampliação dos estudos sobre carste em rochas não carbonáticas, contribuindo para os estudos espeleológicos no Brasil. A estrutura geológica das cavernas da Província apresenta-se notadamente em arenitos friáveis da Formação Maecuru, pertencente ao Grupo Urupadi. Os processos que envolvem a formação das cavernas estão associados principalmente à ação mecânica da água (erosão hídrica), embora a ação química da água apresente papel fundamental na dissolução intergranular.

Palavras-chave: Carste não carbonático; espeleologia; Amazônia.

Karst in Non-Carbonate Rocks: contribution in geomorphological study in sandstones caves of the Paraense Amazon

ABSTRACT

The Karst Geomorphology is a branch of geosciences dedicated to investigate nature, genesis and formation processes of natural underground cavities, which include different denominations as caves, shelters, grottos, etc., and understand its related features. The term karst is related to carbonate rocks (limestones, dolomites), but there are also caves developed in siliciclastic rocks (sandstones, conglomerates, shales), metasedimentary (quartzite, iron formation), igneous (granite, basalt), etc. In the Amazon region, which is rich in geomorphological features resulting from systemic interaction of nature elements stand out caves in sandstones. For example, there is the Speleological Province Altamira-Itaituba (Pará state), located in the contact zone of the geological domains of the sedimentary basin of the Amazon and the crystalline basement of the Xingu complex. In this sense, the proposed study, based on the geosystemic analysis of the landscape, presents an amplification of the studies on karst in non-carbonate rocks, contributing to speleological studies in Brazil. The geological structure of the caves of the Province presents notably in friable sandstone of Maecuru Formation belonging to Urupadi Group. Processes involving the formation of the caves are mainly associated with the mechanical action of water (water erosion), although the chemical action of water present in the fundamental role on intergranular dissolution.

Keywords: Non-carbonate karst; Speleology; Amazon.

Introdução

A paisagem cárstica caracteriza-se, de maneira geral, por um conjunto de feições esculpidas no relevo, de aspecto ruiforme, desenvolvida em ambiente superficial (exocarste) e subterrâneo (endocarste), nos quais se gera uma paisagem particular composta por torres, paredes verticais, lapiás, dolinas, sumidouros, drenagem criptorréica, sistemas de galerias e cavernas subterrâneas, espeleotemas, etc. Atualmente reconhece-se que a paisagem cárstica está presente em litologias diversificadas, não cabendo apenas aos processos de dissolução ocorrentes em rochas carbonáticas, conforme Travassos (2014), com diferenças no tocante ao papel desempenhado pelo intemperismo químico e físico.

Os estudos espeleológicos revelam que são reconhecidas cavernas bem desenvolvidas em rochas tais como arenitos, quartzitos, gnaisses, micaxistos, basaltos, formações ferruginosas, rochas vulcânicas alcalinas, entre outras, indicando uma extensão do uso do termo aplicado a outras rochas, em que os processos espeleogenéticos não estão, seguramente, relacionados com dissolução (como ocorre nas rochas carbonáticas). Em rochas siliciclásticas predominam processos mecânicos. Enquanto nas rochas carbonáticas a porosidade primária não é recorrente, predominando a secundária (aquífero em meio fissural), nas rochas siliciclásticas a porosidade primária é regra (aquífero em meio poroso).

Na região Amazônica é identificada a presença de relevo cárstico de rochas siliciclásticas. Algumas dessas paisagens de exceção encontram-se inseridas no contexto geológico da bacia sedimentar do Amazonas e fazem parte de um conjunto paisagístico denominado Província Espeleológica, composta por rochas susceptíveis aos processos cársticos.

Nesse contexto geológico-geomorfológico, apresenta-se a Província Espeleológica Altamira-Itaituba, localizada no estado do Pará, que se destaca por ser um conjunto de cavidades naturais subterrâneas com diferentes feições endogenéticas, em sua maioria formada pelo processo de arenitização (desgaste das rochas por água meteóricas).

Na literatura científica pode-se notar que o tema que trata do carste e seu desenvolvimento está relacionado principalmente às rochas calcárias, onde os processos de formação das cavernas são representados pela dissolução de seu material constituinte, o carbonato. Mas no

momento em que ocorrem cavernas em demais tipos de rochas, as quais o carbonato não está predominantemente presente, como então definir esse tipo de relevo?

Em se tratando de paisagem cárstica, os setores da Província Espeleológica Altamira-Itaituba apresentam um ambiente cujas feições não foram desenvolvidas no contexto de rochas carbonáticas, apresentando uma estrutura predominantemente de rochas em arenito.

A ocorrência de camadas de arenito friável, o fraturamento da estrutura geológica, de origem tectônica, associado às variações isostáticas, deram início ao processo que gerariam as cavernas. A ação mecânica da água (erosão hídrica e arenitização), verificados pela subida do nível do lençol freático, submeteu o arenito a condições freáticas, apresentando-se então um dos principais fatores de esculturação das cavidades.

Sabe-se que as condições climáticas das regiões tropicais e equatoriais apresentam precipitações anuais com médias pluviométricas de 1000 a 4000 mm, agindo mecanicamente de maneira mais intensa nos processos de desenvolvimento de cavernas. Contudo, as condições de altas temperaturas e umidade, bem como a presença de matéria orgânica abundante, fazem com que o ambiente produza mais CO₂, resultando na atividade química nas rochas, ao passo que a ação química da água tenha papel fundamental na dissolução intergranular.

É fato que por mais que não sejam rochas carbonáticas existe a formação de cavernas com características de endocarste. Por esse motivo esse modelado de relevo tem sido tratado como pseudocarste, do inglês *pseudokarst* (White, 1988; Urban e Oteska-Budzin, 1998; Bigarella et al., 1994; Kohler, 2007; Hardt et al., 2009; Suguio, 2010; Guareschi e Nummer, 2010; Simmert, 2010).

De acordo com Simmert (2010), o termo pseudocarste foi citado pela primeira vez na literatura em 1906, pelo geólogo alemão Walter von Knebel, ao realizar uma análise dos fenômenos cársticos e descrever cavernas de lava vulcânica com suas estruturas semelhantes a espeleotemas pendurados no teto. Na sequência à pesquisa de Knebel são registrados notórios trabalhos e eventos científicos que foram estabelecendo, em nível mundial, o uso do termo *pseudokarst*:

- na classificação de fenômenos pseudocársticos em *loess* e sedimentos argilosos por Savarenskij, em 1931;

- no lançamento do Pseudokarst Symposium, em 1982, realizado na República Checa, que vem acontecendo a cada dois anos, tornando-se então International Symposium on Pseudokarst a partir de sua terceira edição, em 1988, com eventos a partir de discussões, publicações e apresentações de pesquisas sobre o tema;
- criação de uma comissão independente sobre Pseudocarte (Pseudokarst Commission) da Union Internationale de Spéléologie (UIS), fundada durante o Congresso Internacional de Espeleologia, em 1997, reunindo cientistas, instituições e interessados na temática, e;
- nas pesquisas espeleológicas que cientistas russos e italianos têm realizado com uso do termo, em meados do século 20.

Diversos exemplos podem ser descritos para designar uma caverna que não seja em rocha calcária. É possível definir formas cársticas com origens associadas a fatores tais como: o derretimento de gelo em geleiras; os colapsos ou os movimentos de blocos; a drenagem subterrânea em rochas areníticas com a dissolução e corrosão dos silicatos; a erosão mecânica e processos de colapsividade dos solos em sedimentos recentes; os movimentos tectônicos; o vulcanismo; entre outros casos em investigação (Guareschi e Nummer, 2010; Simmert, 2010).

Apesar de *pseudo* ser um radical de origem grega que significa falso, a qual em sua estrutura linguística expressa a ideia de algo que não é verdadeiro, na literatura internacional o uso do termo *pseudokarst* acabou permanecendo ao longo do tempo, sendo reconhecido como uma nova proposição e aceita como uma abordagem que envolve o desenvolvimento de cavernas de rochas não carbonáticas. Em suma, Simmert (2010) define que o termo *pseudokarst* descreve fenômenos ou partes de uma paisagem que mostra qualidades ou características de origem cársticas, embora a rocha ou sedimento mineral formado não seja considerado capaz de formar um relevo cárstico

Como membro da comissão sobre Pseudocarte da *Union Internationale de Spéléologie* – UIS, Hartmut Simmert (op. cit.) descreve em seu artigo “*What is Pseudokarst?*”, dentre inúmeras discussões que ocorreram, assim

resolveram deixar em uso o termo *pseudokarst* com a justificativa da aplicação notória na ciência internacional e a ausência de outro termo científico melhor. No Brasil, por sua vez, o termo ainda não é bem compreendido em sua nomenclatura, tornando-se mais apropriado denominar esse conjunto de cavernas como “carste em rochas não carbonáticas”, ou mesmo uma terminologia vinculada ao tipo litológico, tais como “carste em arenitos”, “carste em quartzitos”, etc. Tem-se, então, um problema de origem histórica, haja vista que parte dos geólogos e geomorfólogos brasileiros preferem definir que o carste, uma vez que foi inicialmente estudado em carbonatos, tem que ser definido como um tipo de um relevo que ocorre no calcário. Nesse sentido, Travassos (2014) afirma que somente a presença de uma cavidade natural subterrânea não é o suficiente para caracterizar uma área como sendo carste.

Andreychouk et al. (2009) e Travassos (2014) já apresentam a designação de carste não tradicional. De acordo com esses autores trata-se de uma classificação genética baseada nas fontes de energia dos processos. Em seus estudos geralmente utilizam parâmetros físicos independentes, como a temperatura e a pressão, para definir as particularidades da carstificação dentro dos diferentes tipos genéticos. Nesse sentido, introduziram o termo carste heterogêneo (*heterogeneous kars*) como uma categoria genética que define o desenvolvimento de cavidades em rochas submetidas às forças conjuntas de energia endógena e exógena, que resultam em processos cársticos configurados no tempo e no espaço.

A literatura brasileira sobre Geomorfologia Cárstica faz pouca menção a esses sistemas espeleológicos diferenciados. De acordo com os dados do Cadastro Nacional de Cavernas da Sociedade Brasileira de Espeleologia (CNC/SBE, 2017), as cavernas de calcário e dolomita representam 67,8% do total registrado, demonstrando assim um número de pouco mais de 30% de cavernas desenvolvidas em rochas não carbonáticas (Tabela 01).

Tabela 01. Litologia e número de cavernas do Brasil.

Litologia	Nº de Cavernas Por Litologia	% em relação ao Brasil
Calcário	4275	67,5
Metassedimentares (quartzito, formação ferrífera)	808	12,8
Rochas siliciclásticas (arenitos, conglomerados, argilitos)	655	10,3
Ígneas (granito, basalto)	195	3,1
Dolomito	145	2,3
Carbonatos Indiferenciados	109	1,7
Mármore	62	1,0
Depósitos supérgenos (bauxita, canga)	42	0,7
Metaígneas (gnaisses)	30	0,5
Xisto	12	0,2
Tufa/Travertino	3	0,2

Fonte: SBE, 2017 (<http://cnc.cavernas.org.br/cnc/Stats.aspx>)

Apesar do número reconhecido desses litotipos, as pesquisas que tratam da espeleogênese em feições não carbonáticas e fenômenos cársticos associados a ela ainda são bastante reduzidas. Contudo, é crescente o número de teses, dissertações e artigos científicos que tratam da temática, tais como: Wernick et al. (1976); Veríssimo e Spoladore (1994), Sallun Filho e Karmann (2007), Hardt (2011), Robaina e Bazzan (2008), Hardt e Pinto (2009), Hardt, et al. (2009); Morais e Souza (2009), Guareschi e Nummer (2010), Morais e Rocha (2011), Fabri e Augustin (2013), Souza e Salgado (2014), Pinheiro et al., (2015) e Freire et al. (2015).

Assim, nos últimos anos o tema ganha atenção por parte dos estudiosos científicos, a exemplo da Sociedade Brasileira de Espeleologia – SBE que publicou um volume de sua revista Espeleo-tema (v.22, 2011) com edição especial intitulada “Carste e ocorrências não cársticas em rochas não carbonáticas”, além do 7º Encontro Mineiro de Espeleologia realizado em 2014, evento com a temática “Cavernas em rochas não carbonáticas”. Hardt *et al* (2009) acrescenta que no início o conceito de carste estava intimamente associado à litologia, atualmente isso mudou, e tem então vários exemplos de carste em rochas não carbonáticas que foram identificados e sendo estudados no mundo afora. A autores ainda afirmam que não se pode aceitar a atribuição de um termo genérico e pouco claro a uma área, denominando-a de pseudo-carste, só porque não se trata de calcário.

O presente artigo soma-se como mais uma contribuição sobre a paisagem endocárstica em rochas não carbonáticas, bastante comum na Amazônia. Considerando que a Espeleologia é uma atividade de múltiplo sentido (científico, esportivo, turístico e sociocultural), o objetivo desta pesquisa é contribuir para o aprofundamento

e disseminação de conhecimentos particulares do carste em rochas não carbonáticas. Para isso, foi feito um estudo de caso em arenitos da formação Maecuru, por meio de estudos realizados na paisagem da Província Espeleológica Altamira-Itaituba (PA).

Material e métodos

A metodologia da pesquisa é fundamentada na análise geossistêmica, uma vez que se mostra útil para entender a constituição do ambiente espeleológico, envolvendo os aspectos da dinâmica geológica e geomorfológica da estruturação da paisagem cárstica, oferecendo assim as bases para um conhecimento sobre o processo de formação das cavernas.

O estudo sistêmico é realizado mediante análise e investigação das partes componentes de um todo, que é o conjunto de elementos relacionados entre si e com certo grau de organização os quais atingiram determinado objetivo ou finalidade. O todo sempre estará condicionado às relações e conexões estabelecidas entre suas partes, de forma que, caso haja alguma alteração em uma das partes, esta afetará a configuração final do todo. Nesse sentido, Sotchava (1977) afirma que a teoria geossistêmica demonstra que na análise da paisagem devem-se estudar as conexões entre os componentes da natureza, e não eles separados do todo.

O conceito de paisagem é inserido ao estudo de geossistemas pelo fato de ser apontado como o efeito visual ou uma representação daquilo que é percebido, por meio da conjunção de objetos visíveis pelo sujeito vinculados às suas necessidades e perspectivas de uso (Bertrand, 2004).

Na Província Espeleológica Altamira-Itaituba são registradas ocorrência de cavernas nos municípios paraenses de Altamira, Anapú, Aveiro,

Brasil Novo, Itaituba, Medicilândia, Placas, Rurópolis, Uruará e Vitória do Xingu. Na figura 01 pode-se visualizar onde estão localizadas as cavernas da província ao longo da borda sul da bacia sedimentar do Amazonas, coincidindo com as proximidades do rio Xingu, em seu baixo

curso, e da rodovia Transamazônica (BR-230). Contudo, nesta pesquisa, são analisadas como exemplos as cavidades naturais subterrâneas desenvolvidas em arenitos da porção nordeste da província, tendo como principais cavernas as da Planaltina, Pedra da Cachoeira e do Limoeiro.

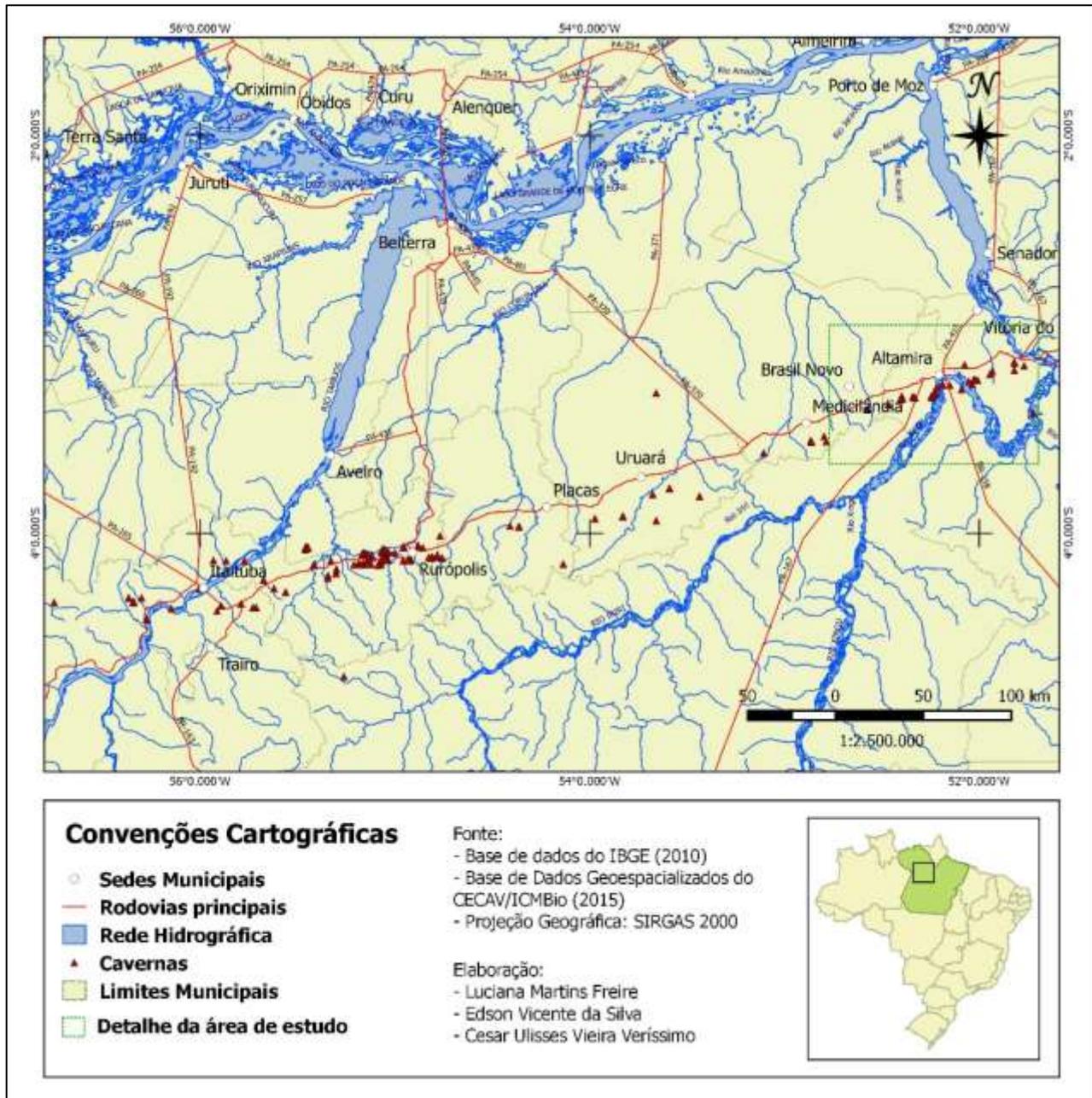


Figura 01. Mapa de Localização da Província Espeleológica Altamira-Itaituba (PA)

A primeira etapa da pesquisa desenvolveu-se por meio do levantamento de bibliografias relacionadas a área de estudo, com textos e documentos que subsidiaram a identificação das paisagens espeleológicas alocadas no domínio da Amazônia. Assim, realizou-se uma pesquisa sobre a geologia e geomorfologia da bacia sedimentar do Amazonas, identificando os

processos naturais de formação de províncias espeleológicas nesse ambiente. Citam-se: Projeto RADAMBRASIL – DNPM (1974); Vasques e Rosa-Costa (2008); e Ministério de Minas e Energia – MME (2009).

As informações referentes à área da Província Espeleológica Altamira-Itaituba foram adquiridas com base no exame e análise de

material bibliográfico e cartográfico produzido por instituições oficiais, tais como: Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas / Instituto Chico Mendes (CECAV/ICMBio); Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE); Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM); Projeto RADAM Brasil, produzido pelo DNPM; arquivo técnico-científico do Grupo Espeleológico Paraense – GEP, artigos científicos (Pinheiro et al., 2015) e documentos exigidos para a autorização da implantação do Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) de Belo Monte, tais como a Avaliação Ambiental Integrada (AAI) dos Aproveitamentos

Hidrelétricos da Bacia Hidrográfica do Rio Xingu (BRASIL/MME, 2009) e Estudo de Impactos Ambiental (EIA) do AHE Belo Monte (ELETROBRÁS, 2009).

Os trabalhos de campo foram realizados obedecendo-se às condições climáticas favoráveis (principalmente nos períodos de estiagem), abrangendo um território no qual estão inseridos os municípios paraenses das três principais cavernas da província: Altamira (Caverna Pedra da Cachoeira), Brasil Novo (Caverna Planaltina) e Medicilândia (Caverna do Limoeiro), como pode ser visto na figura 2.

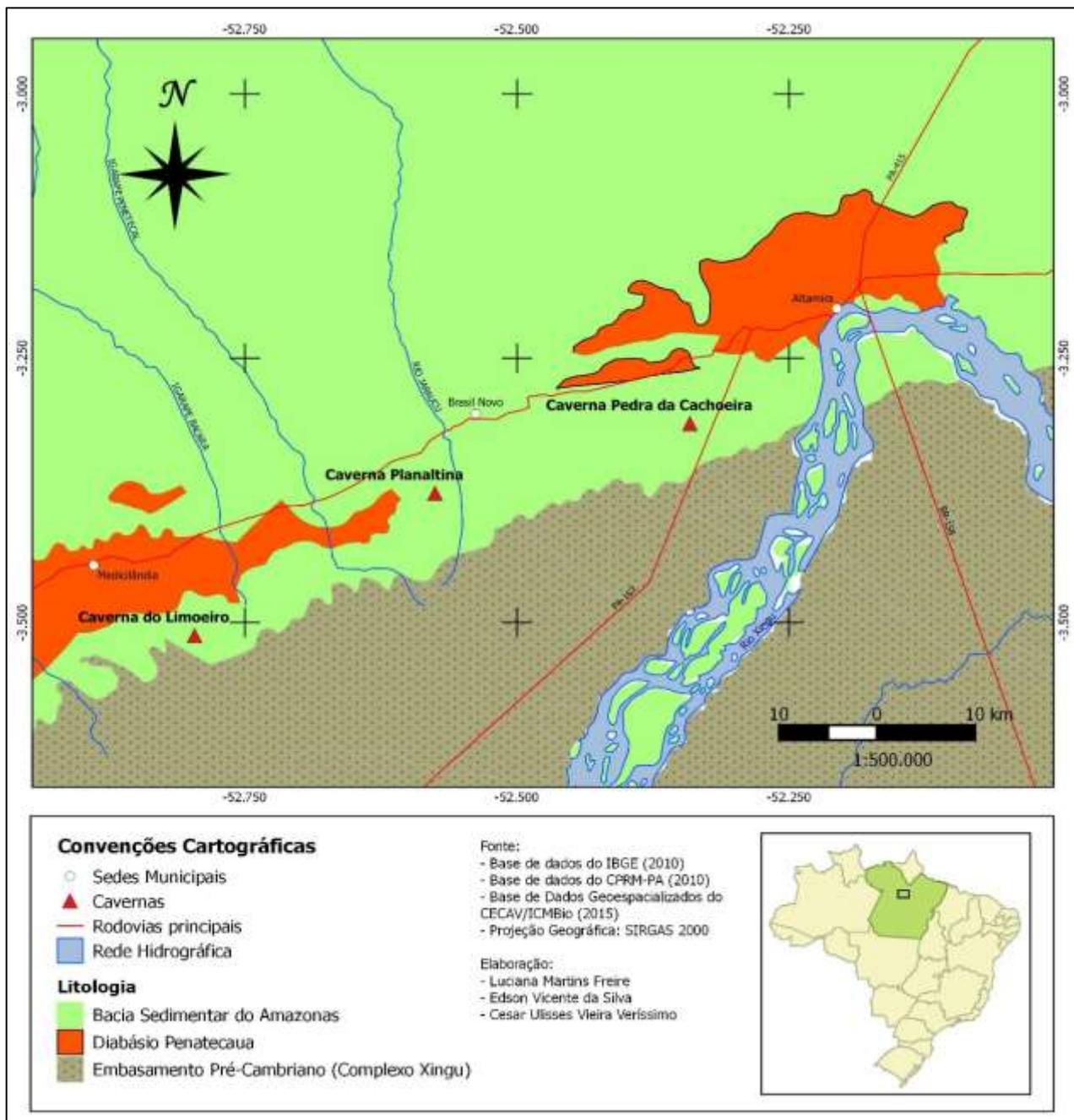


Figura 2. Mapa da localização das três principais cavernas da província.

O acompanhamento ocorreu com auxílio de cartas e mapas em escalas 1:125.000 (ELETROBRÁS) e 1:1.000.000 (CPRM) já produzidos sobre a região estudada. Além da comprovação dos dados bibliográficos, são descritos detalhamentos das características espeleométricas (medidas dos condutos e salões, tipos de espeleotemas, dentre outras) e das condições hidrogeológicas da região em que estão inseridas as cavernas.

Resultados e discussão

Contextualização físico-ambiental das cavernas na Amazônia Paraense – O contexto espeleológico do Pará apresenta uma riqueza em número de cavernas que o coloca em 2º lugar no ranking nacional (registrando 801 cavernas, 12,3%), atrás apenas do estado de Minas Gerais (com 2030 cavernas, 31,2%), de acordo com Cadastro Nacional de Cavernas da Sociedade Brasileira de Espeleologia (2017). O Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

– CECAV, pertencente ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio, desde 2004 vem reunindo registros na base de dados geoespacializados que demonstram a localização das cavernas brasileiras. Em dezembro de 2015 essa base contava com o registro de 2.560 cavidades naturais subterrâneas. É um número bastante expressivo, ainda mais por constar de um elevado número de cavernas não carbonáticas, em sua maioria formada por rochas areníticas e ferríferas.

A partir dos dados da CEVAC/ICMBio (2016), é possível ter uma verdadeira noção da grandeza espeleológica contida no estado do Pará. De todo o universo registrado, menos de 1% das cavernas são de rochas calcárias. A maioria está concentrada em minérios de ferro, seguidas de quartzitos e rochas de arenitos (Tabela 2). Tratam-se de feições cársticas não carbonáticas, em que a investigação científica sobre o assunto ainda é promissora, principalmente para a região Amazônica.

Tabela 02. Litologia e porcentagem de cavernas do Pará.

Litologias	% em relação ao Pará
Minério de Ferro	65,45%
Quartzito	19,02%
Arenito	6,43%
Rochas Siliciclásticas (Arenito / Conglomerado / Argilito)	3,23%
Calcário	0,90%
Arenito / Conglomerado / Argilito	0,78%
Granito / Basalto	0,51%
Canga	0,27%
Quartzito / Arenito	0,27%
Rocha Bauxítica	0,23%
Metassedimentares (Quartzito / Formação Ferrífera)	0,19%
Arenito com cimeira	0,12%
Ferro	0,08%
Bauxita	0,04%
Canga e Formação Ferrífera Bandada	0,04%
Folhelho	0,04%
Formação Ferrífera Bandada	0,04%
Quartzito / Formação Ferrífera	0,04%
Quartzito / Laterita	0,04%
Siltito	0,04%
Xisto Betuminoso	0,04%
Sem informação	2,18%
Total Geral	100,00%

Fonte: CEVAC/ICMBio, 2015.

Uma vez reconhecida a ocorrência e distribuição das cavidades naturais subterrâneas,

de acordo com Pinheiro et al. (2015), o estado do Pará apresenta cinco províncias espeleológicas,

distribuídas em três grupos de acordo com suas características de formação e constituição (Figura 03):

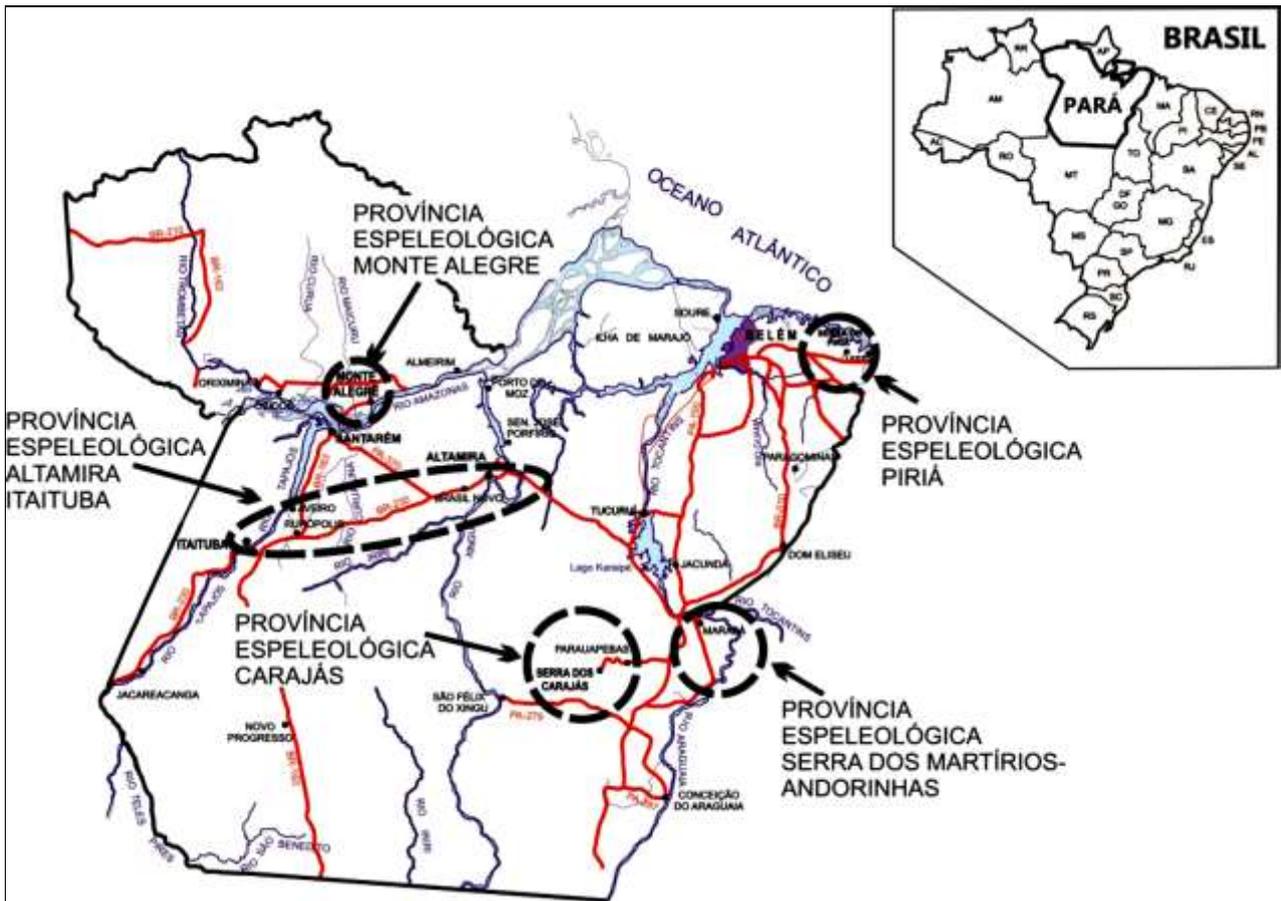


Figura 02. Mapa do estado do Pará com a localização das cinco províncias espeleológicas conhecidas.
Fonte: Pinheiro et al. (2015, p. 6)

- **Províncias Espeleológicas da Serra dos Carajás e Serra do Piriá:** ocorrem na área dos escudos arqueanos e proterozóicos, com cavernas presentes em rochas ferríferas e em rochas vulcânicas alteradas por intemperismo;
- **Província Espeleológica da Serra dos Martírios-Andorinhas:** com as cavernas em quartzitos ocorrentes nas faixas móveis proterozóicas (Faixa Araguaia);
- **Províncias Espeleológicas Monte Alegre e Altamira-Itaituba:** com cavernas em arenitos e algumas raras em calcário, localizadas nos domínios da bacia sedimentar paleozóica do Amazonas-Solimões.

Como se pode observar na figura 2, a Província Espeleológica Altamira-Itaituba ocorre próximo ao ambiente de contato entre a Bacia Sedimentar do Amazonas (em sua borda sul) e o Embasamento Pré-Cambriano Complexo Cristalino do Xingu. A grande Sinéclise Amazônica resultou de prolongados processos de sedimentação iniciados no Paleozóico, da qual a

Bacia do Amazonas estende-se por uma área de aproximadamente quinhentos mil quilômetros quadrados. Esta bacia sedimentar foi formada por sucessivas transgressões marinhas epicontinentais sobre o Cráton Amazônico e exibe discordâncias erosivas e hiatos de sedimentação, entre o Neorodoviciano e o Neopermianiano, intercalados por soerguimentos vinculados às orogenias relacionadas a abertura do Atlântico Equatorial e à separação das placas Africana, Norte-Americana e Sul-Americana durante o Cretáceo e o Paleoceno (Vasques e Rosa-Costa, 2008). Na sequência, passaram por processos de estruturação, morfogêneses e sedimentação até hoje atuante, relacionadas à atividade neotectônica do tipo transcorrente. “Dois pulsos de movimentação, atribuídos aos intervalos Mioceno-Plioceno e Pleistoceno superior-Holoceno, estão representados por deslocamentos, sedimentação, morfogênese e controle de drenagem” (Suguió, 2010, p.258).

A Província Espeleológica concentra-se em uma área ao sul da Bacia Sedimentar do

Amazonas, na região entre os rios Xingu e Tapajós, delimitada numa estreita faixa com aproximadamente duzentos quilômetros de eixo maior e vinte e cinco quilômetros de eixo menor, com feições dispostas em faixas subparalelas com direção geral ENE-WSW, com o rio Xingu constituindo o limite leste (ELETROBRÁS, 2009; Pinheiro et al., 2015). Por esse motivo, as estruturas escarpadas da borda de *cuesta*, com inclinações entre três e cinco graus, abrigam boa parte das cavidades naturais subterrâneas da Província.

O relevo da região da Província Espeleológica Altamira-Itaituba apresenta amplitude de cotas altimétricas que variam entre 50m e 100-180m. Caracteriza-se por vales encaixados em baixas altitudes e colinas e topos de platôs em cotas em torno de 120m, com predominância de morros aplainados e ocorrências eventuais de cristas suaves e recobertos por capa laterítica. Essa capa é resultado do arenito endurecido por silicificação e/ou ferruginização de origem intempérica, de idade terciária, desenvolvendo assim platôs mais resistentes ao desgaste físico-erosivo (erosão diferencial), aprofundando vales e gerando encostas íngremes nos *fronts* das *cuestas*. As frentes de *cuestas* são descontínuas, com *fronts* voltados para sul, onde as cavernas estão alocadas em suas bases, logo acima dos leques de colúvios

(depósitos de talus), e em vales encaixados nas incisões dos platôs (Pinheiro et al., 2015) (figura 04).

Localmente na área de estudo, além do rio Xingu há também ocorrência de alguns afluentes (chamados regionalmente de igarapés) que se originam em nascentes dispostas ao longo dos vales e surgências de águas no interior das cavernas. A drenagem subterrânea (horizontal e vertical) é o principal responsável pelo padrão erosivo das paredes laterais. Em algumas cavernas da região, é possível perceber marcas de deslocamentos da drenagem em galerias atualmente secas (figura 05). Especificamente, a estrutura geológica das cavernas da Província apresenta-se notadamente em arenitos da Formação Maecuru, pertencente ao Grupo Urupadi, de ampla ocorrência na Bacia do Amazonas e que registra um novo ciclo sedimentar. O Grupo Urupadi, com posicionamento litoestratigráfico no Eo-Devoniano, entre 416 milhões e 397 milhões e 500 mil de anos atrás, está sobreposto ao Grupo Trombetas, do Siluriano (Vasques e Rosa-Costa, 2008). A Formação Maecuru é constituída por arenitos finos com intercalações siltosas e argilo-siltosas, amarelados e avermelhados, além de apresentar arenitos conglomeráticos (ELETROBRÁS, 2009).

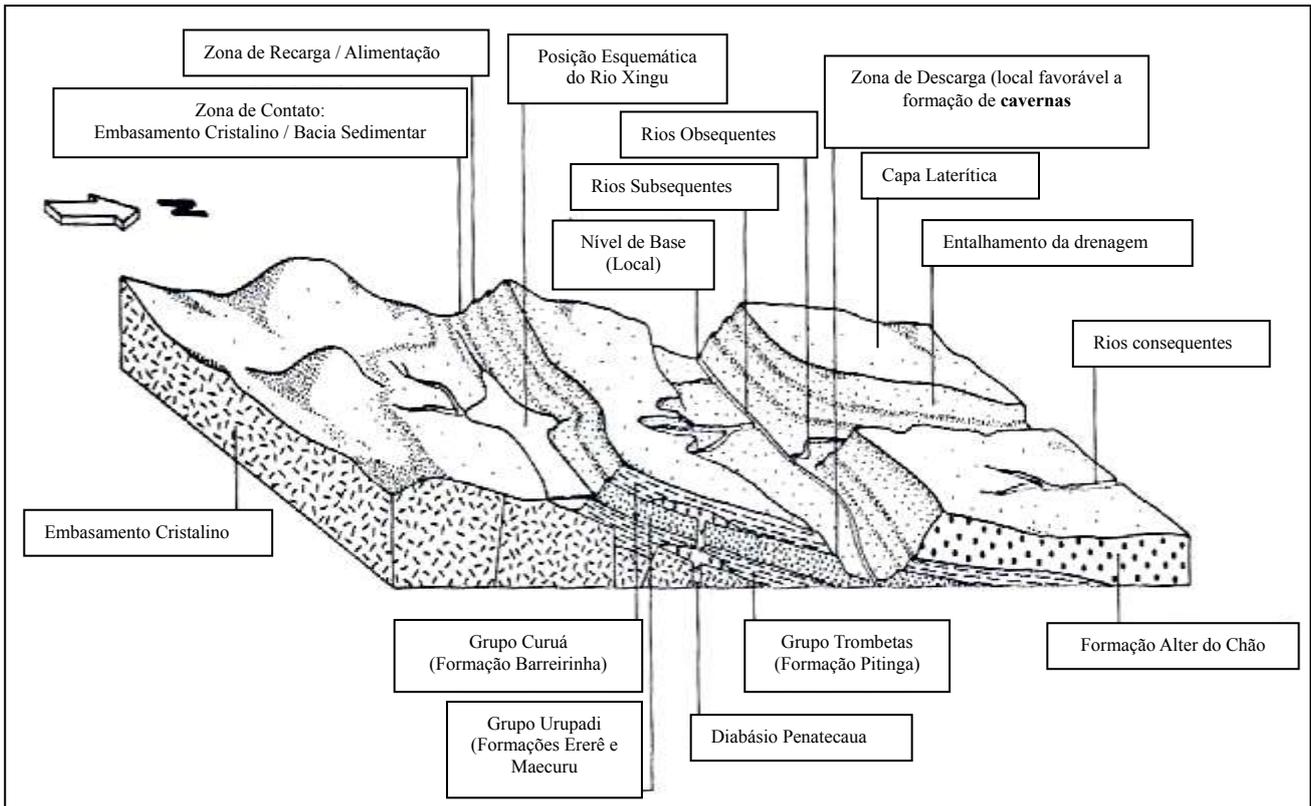


Figura 04: Bloco diagrama esquemático da Borda Sul da Bacia Sedimentar do Amazonas – proximidades de Altamira, Estado do Pará, ilustrando o posicionamento das suas Formações Geológicas em relação aos elementos de relevo e padrão de drenagem da região (sem escala).
Fonte: Adaptado de EIA Belo Monte, ELETROBRÁS, 2009.



Figura 05. Ampliação e exposição dos condutos e galerias evidenciados pela oscilação do nível do lençol freático, desagregação mecânica dos grãos (paredes) e intemperismo químico (parte escura do teto) na Caverna Pedra da Cachoeira (Altamira-PA).
Fotos: Luciana Freire, 2015.

Evolução e estruturação da paisagem cárstica em arenitos – As cavidades em arenito da Província Espeleológica Altamira-Itaituba (PA) são formadas pelo processo de arenitização, que

representa o ataque geoquímico resultante da corrosão química das rochas por águas meteóricas ácidas, em que nesse estágio parte do cimento silicoso da rocha é dissolvido, deixando assim a

rocha friável (Pinheiro et al., 2015; Freire et al., 2015). Tal processo é iniciado no Quaternário, marcado pelas variações climáticas estabelecidas nesse período, levando assim ao entalhe dos padrões de escoamento que foram desenvolvendo-se ao longo do tempo.

De acordo com ELETROBRÁS (2009), a dissolução do quartzo durante o processo de *arenitização* da rocha pode tomar dois caminhos: “se a taxa de dissolução da sílica é baixa, a dissolução fica restrita às bordas dos grãos ou cristais, ou seja, em seus contatos; se a taxa de dissolução é muito alta, sem aumento da solubilidade, a topografia pode ser afetada por ação desse processo e desenvolver morfologia característica de terrenos cársticos” (p. 73).

Não muito diferente do que ocorre na Província Espeleológica Altamira-Itaituba, outras regiões brasileiras de rochas siliciclásticas também apresentam processo de desenvolvimento das cavernas em arenitos muito semelhantes. Destacam-se os estudos realizados na Gruta Refúgio do Maroaga – AM (KARMANN, 1986), em São Jerônimo da Serra – PR (SPOLADORE, 2006), no Vale do Rio Barra Grande – SC (SANTOS, 2006), em cavernas do Paraná (SPOLADORE; COTTAS, 2007), na Serra do Lajeado – TO (Morais e Souza, 2009), na Chapada dos Guimarães – MT e na Serra de Itaqueri – SP (Hardt et al., 2009), nos arenitos da Formação Furnas – PR (Melo et al., 2011; Massuqueto et al., 2011; Pontes e Melo, 2011), no oeste do estado do Rio Grande do Sul (Robaina e Bassan, 2008), entre outros.

Diante dessas referências e outros modelos analisados, Pinheiro et al. (2015) sugeriram episódios sequenciais para explicar a ocorrência de cavernas na Província Espeleológica Altamira-Itaituba – PA, também representados na figura 06:

A. Fraturamento da estrutura geológica, de origem tectônica, associado às variações isostáticas

(processos de soerguimento regional da estrutura sedimentar), com sequência de esculturação do relevo por processos erosivos;

- B. Processos intempéricos e erosivos verificados pela subida do nível do lençol freático, submetendo o arenito a condições freáticas, configurando-se assim o início do processo de arenitização. A água que infiltra na rocha causa a corrosão química de minerais, como também a desagregação mecânica dos grãos, gerando rochas friáveis, susceptíveis à erosão. As condições de acidificação têm relação com a presença da floresta densa e clima quente e úmido da região, que elevam a concentração de ácido orgânico na água;
- C. Oscilações do nível do lençol freático. Com o soerguimento do relevo, as águas subterrâneas foram rebaixando e a distância do lençol freático em relação à cota de superfície dos vales e drenagens foi aumentando. Assim, o desnível entre estas duas superfícies ficou maior, induzindo fluxo sobre a rocha arenitada e o início do processo de erosão mais ativo, que leva à formação da caverna, com o desenvolvimento de condutos e galerias subterrâneas (Figura 05);
- D. Erosão da rocha friável por fluxo dirigido pelas fraturas, levando a ampliação e exposição dos condutos e galerias em ambiente vadoso por meio da remoção de partículas da rocha induzida pelo fluxo hidráulico (*piping*), ação gravitacional e escavação fluvial. Verifica-se, nesse momento, ocorrência de colapsos de blocos rochosos acompanhado do avanço da precipitação mineral e do revestimento seletivo dos espaços internos da caverna (espeleotemas). Essa etapa constitui a configuração atual das cavernas, que apresentam processos dinâmicos ativos, uma vez que a região amazônica apresenta fluxo contínuo do ciclo hidrológico (Figura 05).

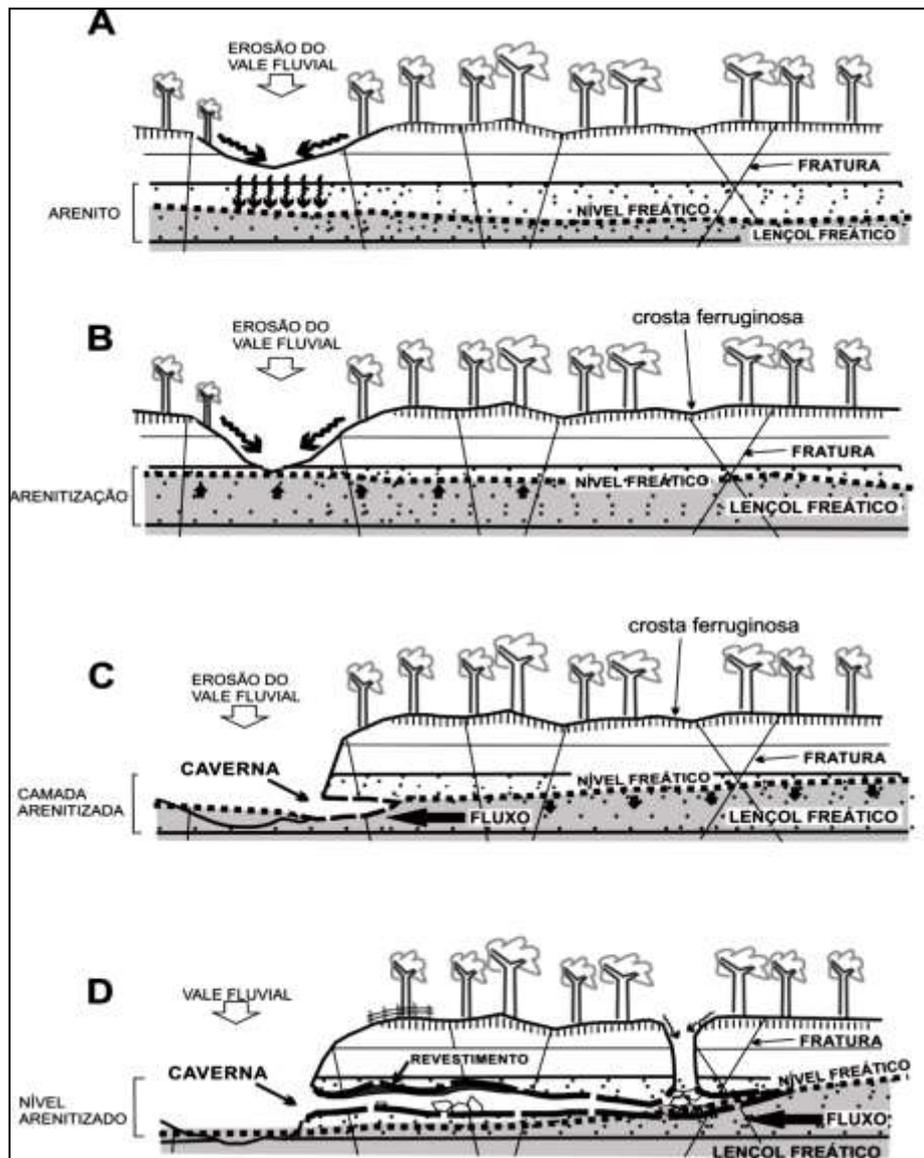


Figura 06. Explicação esquemática dos estágios de desenvolvimento de cavernas na Província Espeleológica Altamira-Itaituba.
 Fonte: Pinheiro et al. (2015, p. 14)

Os estágios de desenvolvimento das cavernas e a distribuição das suas formas revelam um verdadeiro sistema organizado de acordo com a funcionalidade dos elementos envolvidos, o que caracteriza o sistema cárstico. Trata-se de um sistema aberto, em que há o ingresso, o transporte e a saída de água, além de outros elementos minerais e orgânicos carregados junto.

Diante do sistema apresentado, verifica-se que no desenvolvimento de cavernas em rochas silicosas é perceptível a presença da dissolução das rochas, o que torna impossível um evento unicamente associado à ação mecânica (intemperismo físico e erosão). Essa premissa reforça uma definição focada no termo carste vinculado a outras litologias que não sejam apenas de rochas carbonáticas.

Tem-se, em rochas silicosas notadamente, condições que permitem o aparecimento de sistemas cársticos, produzindo um conjunto de formas, cuja origem teve forte contribuição do intemperismo químico. A distribuição das formas na paisagem permite, portanto, descrever o funcionamento do sistema, desde seus estágios de ingresso até a restituição das águas, da mesma forma que ambientes carbonáticos (Hardt, 2011, p.155).

A partir do processo de infiltração de água pelos sistemas de fraturas, o processo de formação das cavernas inicia-se após a desagregação e remoção dos grãos de quartzo por arenitização, com a dissolução parcial do cimento. Dessa maneira, o arenito fica mais poroso, permitindo a

passagem de fluxo aquoso e deixando os grãos soltos. Nesse momento o ambiente subterrâneo fica susceptível à ampliação de condutos, galerias

e salões, que se desenvolvem por meio de feições erosivas designadas como *pipings* (Figura 07).

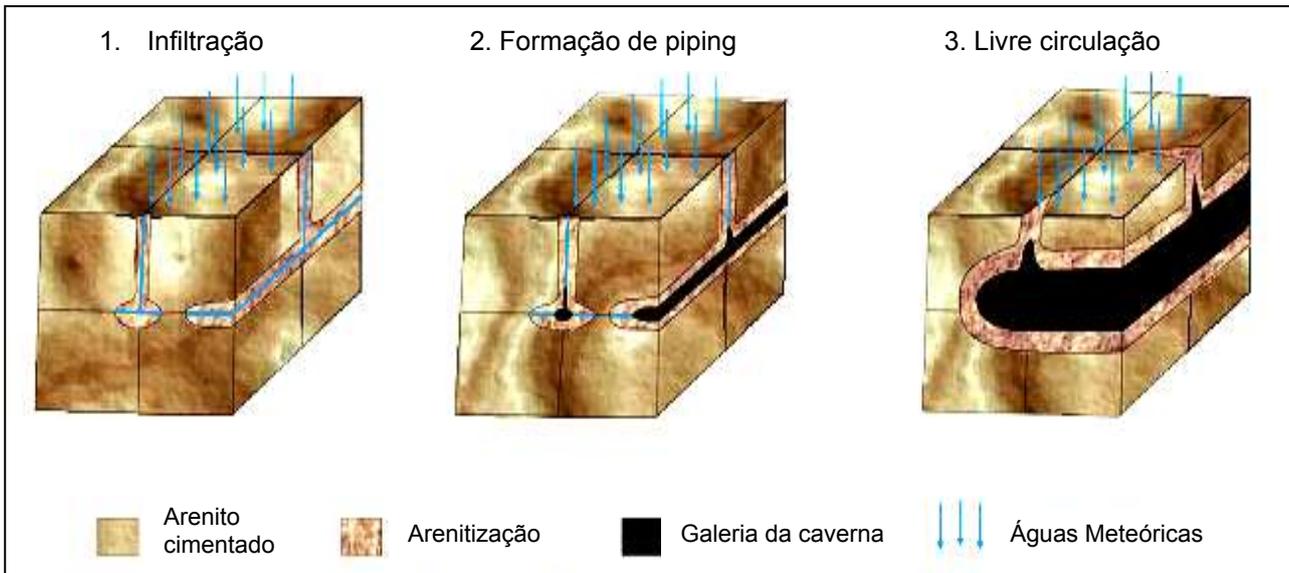


Figura 07. Modelo esquemático de evolução das feições erosivas *piping*, por arenitização
 Fonte: Adaptado de Fabri e Augustin (2013)

Como a própria denominação afirma, as cavidades naturais subterrâneas desenvolvem-se a partir da erosão hídrica subterrânea, realizado pelo trabalho de escavamento dessas subsuperfícies, ao passo que as entradas das cavidades são expostas pelo recuo erosivo das escarpas da cuesta. Acrescenta-se ao fato de que as rochas areníticas da Formação Maecuru estão posicionadas imediatamente adjacente às rochas do embasamento cristalino, condicionando “a presença de uma zona de alto fluxo hidráulico, potencializando a ação geoquímica e erosiva das águas meteóricas para a formação das cavernas” (Pinheiro et al., 2015, p.15).

Em um estudo sobre os processos de formação do relevo cárstico não carbonáticas em Arkansas, nos Estados Unidos, Ogden (1981) destaca algumas características que são comuns às ocorrentes nas cavernas da região de Altamira-Itaituba: *piping*; dissolução de sílica; colapsos e quedas bruscas de grandes blocos rochosos; e deslizamento por queda de blocos. Consideram-se, também, as semelhanças nas feições litológicas, geológicas e morfológicas em ambas regiões.

Feições cársticas da Província Espeleológica Altamira-Itaituba (PA) – As feições cársticas então relacionadas com a morfologia da caverna, que abrangem as formas observadas nas paredes, no teto e no piso. Estas feições, também chamadas

de ornamentos, podem ter duas designações: espeleotemas e espeleogens. De acordo com Auler (2006), os espeleotemas têm origem associada à deposição química secundária e os espeleogens à estrutura e à erosão, os quais fornecem importantes testemunhos acerca dos mecanismos hidrológicos e espeleogenéticos que atuam no interior da caverna.

O termo espeleotema é proveniente das palavras gregas *spelaiion*, que significa caverna e *thema*, significando depósito, sendo definido como sendo uma feição resultante de depósitos minerais secundários que se originam em uma caverna a partir de uma solução química ou a partir da solidificação de um fluido qualquer. Sendo assim, os espeleotemas originam-se após a fase de abertura da caverna (Spoladore e Cottas, 2007).

Na região interna das cavernas (endocarste) da Província, as feições cársticas não apresentam estalactites nem estalagmites, aspectos morfológicos bastante comuns em cavernas carbonáticas. Os ornamentos mais comuns presentes nas cavernas areníticas têm esculturação ruiforme, tais como coralóides (corais de sílica, ou *coralloids*), pipocas de sílica, caixas de ovos, *scallops*, cascas de ovo, tetos anastomosados e cúpulas de dissolução ou chaminés de equilíbrio (Spoladore e Cottas, 2007; ELETROBRÁS, 2009; Hardt, 2011).

As paredes internas das cavernas estão

revestidas por cimento silicoso, ferruginoso e/ou fosfático, que formam os espeleotemas. Os coralóides (Figura 08) e as pipocas de sílica são provenientes da dissolução da rocha arenítica (arenitização), no qual Spoladore e Cottas (2007)

explicam sua ação pelo gotejamento e escoamento de soluções aquosas saturadas nestes compostos, movimentando-se mediante a ação da gravidade.



Figura 08. Presença de feições em coralóides no teto da caverna Pedra da Cachoeira, Altamira (PA)
Foto: Cesar Veríssimo, 2015.

Os tetos anastomosados também têm composição silicática e/ou de óxido de ferro. Hardt (2011) considera que suas formas delicadas demonstram que sua evolução ocorreu em meio freático através do processo de dissolução

química, com lenta movimentação de água entre as fraturas ou porosidade da rocha. Dessa maneira deduz-se que se houvesse ação mecânica tais formas delicadas não existiriam (Figura 09).



Figura 09. Teto anastomosado na Caverna Pedra da Cachoeira, Altamira (PA).
Foto: Luciana Freire, 2015.

Outro aspecto observado nas cavernas da Província apresenta diversos pontos de ressurgência de água, principalmente no teto, formando pontos de gotejamento que originam os espeleotemas. Nesse caso, ainda dentro dos exemplos de feições desenvolvidas por dissolução, têm-se a presença de cúpulas de dissolução ou chaminés de equilíbrio. São cavidades formadas no teto da caverna, com

formato arredondado, por meio do alargamento proveniente da passagem de água pelas fissuras (diáclase), por dissolução em função de uma maior exposição da superfície rochosa. “Entre o teto de uma cavidade e uma diáclase, aumenta-se a área de contato entre a rocha e a água. Neste contexto, a dissolução da rocha ocorre em escala maior nestas zonas de contato, ampliando-se o volume dissolvido” (Hardt, 2011, p.150).

As caixas de ovos e *scallops* estão presentes em boa parte das cavernas da Província, representando os principais espeleogens configurados (Figura 10). Estas feições são formadas pelo fluxo d'água ao longo do conduto atualmente seco e não apresentam prioritariamente a ocorrência de depósitos minerais, mas sim a retirada de fragmentos.



Figura 10. Aspecto de *scallops* no teto da caverna do Limoeiro, Medicilândia (PA)
Foto: Cesar Veríssimo, 2015.

Conclusões

A geomorfologia cárstica é uma área de estudo das geociências responsável por conhecer e entender a gênese e os processos de formação das cavernas, bem como classificar e caracterizar suas feições exocársticas e endocársticas. A apresentação sobre a formação de ambientes cársticos aplica-se aos modelos de rochas carbonáticas, especificamente quando se trata das misturas químicas sobre elas designadas. Porém a ideia de relevos cársticos tem sido ampliada para outros modelos de cavernas, no qual as características físicas apresentam-se bem semelhantes ao do carste carbonático, tais como cavernas em rochas siliciclásticas (arenitos, conglomerados, argilitos), metassedimentares (quartzito, formação ferrífera), entre demais exemplos já registrados.

As características geoespeleológicas da Província Espeleológica Altamira-Itautuba (PA) confirmam o desenvolvimento de carste em arenitos, em que os processos de formação das cavernas estão associados ao desgaste mecânico das rochas, iniciados pela arenitização. A sequência evolutiva do revelo cárstico no arenito inicia-se pelo gradiente hidráulico e as zonas de percolação de água (planos de falhas/fraturas, acamamento, estratificação plano-

“Todavia, a caixa de ovos também pode ser formada a partir da retirada, do transporte e da deposição de argila e areia fina pela água no teto da caverna” (Spoladore e Cottas, 2007, p.291). Os *scallops* também são marcas onduladas e, especificamente, apontam a direção em que houve o fluxo de corrente d'água, muitas vezes turbulento.

paralela/cruzada, etc.), onde se desenvolvem fenômenos de dissolução por silícia. Na sequência, ocorre a perda de coesão do material arenoso, levando a remoção de partículas mais finas, processo denominado *pipping*. A abertura de condutos e salões subterrâneos segue com colapsos e deslizamentos por desabamento de blocos.

Além da Província em questão, em se tratando de cavernas em rochas siliciclásticas, tal como o arenito, destacam-se diversos estudos já realizados no Brasil (Karmann, 1986; Spoladore, 2006; Santos, 2006; Spoladore e Cottas, 2007; Robaina e Bassan, 2008; Morais e Souza, 2009; Hardt et al., 2009; Melo et al., 2011; Massuqueto et al, 2011; Ponte e Melo, 2011; Fabri e Augustin, 2013; Freire et al., 2015; Pinheiro et al., 2015). Nota-se um crescente interesse nos estudos cársticos de rochas não carbonáticas a partir dos anos 2000.

Esse levantamento revela a importância que a ciência geomorfológica deve direcionar para esta abordagem ao estudo do carste, cabendo assim um maior reconhecimento. Acredita-se que surjam esforços em novos estudos voltados para pesquisas espeleológicas em universidades, centros de pesquisas e grupos de estudo espeleológico.

Agradecimentos

Ao Professor Dr. Roberto Vizeu Lima Pinheiro (FAGEO-IG/UFGA), pelo auxílio incondicional nas pesquisas espeleológicas da Amazônia brasileira. À FAPESPA (Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas), pela viabilização financeira da pesquisa (Edital 005/2014). À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela bolsa de doutorado. Às Universidades Federal do Pará (UFPA) e do Ceará (UFC), pela estrutura e apoio logístico.

Referências

- Auler, A. S., 2006. Relevância de Cavidades Naturais Subterrâneas – Contextualização, Impactos Ambientais e Aspectos Turísticos. Relatório 01. Projeto BRA/01/039. Ministério de Minas e Energia. Secretaria Executiva, Brasília. 166p
- Andreychouk, V.; Dublyansky, Y; Ezhov, Y; Lysenin, G., 2009. Karst in the Earth's Crust: its distribution and principal types. Poland: University of Silesia/ Ukrainian Academy of Sciences/ Tavrichesky National University-Ukrainian Institute of Speleology and Karstology.
- Bertrand, G., 1972. Paisagem e Geografia Física Global - esboço metodológico. Caderno de Ciências da Terra 13, 1-27.
- Bigarella, J. J.; Becker, R. D.; Santos, G. F., 1994. Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais: fundamentos geológicos-geográficos, alteração química e física das rochas e relevo cárstico e dômico. Editora da UFSC, Florianópolis.
- CNC/SBE. Cadastro Nacional De Cavernas / Sociedade Brasileira De Espeleologia, 2017. CNC – Cadastro Nacional de Cavernas do Brasil. Disponível: <http://cnc.cavernas.org.br>. Acesso: 20 jun. 2017.
- CECAV/ICMBIO. Centro Nacional De Pesquisa E Conservação De Cavernas, 2008. II Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental. Brasília: CECAV/ICMBio.
- ELETRONORTE, Centrais Elétricas Brasileiras S.A., 2009. Aproveitamento Hidrelétrico Belo Monte: Estudo de Impacto Ambiental. Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE), Brasília.
- Fabri, F. P.; Augustin, C. H. R. R., 2013. Fatores e processos envolvidos no desenvolvimento de formas cársticas em rochas siliciclásticas em Minas Gerais, Brasil. Revista Geografias 9, 1, 86-96.
- Freire, L. M.; Veríssimo, C. U. V.; Silva, E. V.; Pinheiro, R. V. L.; Lima, J. S., 2015. Consideração sobre o carste não-carbonático da Província Espeleológica Altamira-Itaituba (PA), Brasil. In: GORAYEB, P. S. S, LIMA, A. M. M. Contribuições à Geoecologia da Amazônia: Volume 9. SBG-Núcleo Norte, Belém, pp. 67-80.
- Guareschi, V. D.; Nummer, A. V., 2010. Relevos cársticos em rochas não calcárias: uma revisão de conceitos. In: Figueiredo, L. C.; Figueiró, A. S. (Org.). Geografia do Rio Grande do Sul: Temas em debate. UFSM, Santa Maria, pp. 183-194.
- Hardt, R., 2011. Da carstificação em arenitos. Aproximação com o suporte de geotecnologias. Tese (Doutorado). Rio Claro, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho.
- Hardt, R.; Rodet, J.; Pinto, S. Dos A.F.; Willems, L., 2009. Exemplos Brasileiros de Carste em Arenito: Chapada dos Guimarães (MT) e Serra de Itaqueri (SP). Espeleo-Tema 20, 07-23.
- Hardt, R; Pinto, S. A. F., 2009. Carste em Litologias não carbonáticas. Revista Brasileira de Geomorfologia 10, 99-105.
- Karmann, I., 1989. Caracterização Geral e Aspectos Genéticos da Gruta Arenítica "Refúgio do Maroaga", Am-02. Espeleo-Tema 15, 9-18.
- Kohler, H. C., 2007. Geomorfologia Cárstica. In: GUERRA, A. T. G.; E CUNHA, S. B. Geomorfologia, uma atualização de bases e conceitos. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, pp.309-329.
- Massuqueto, L.L.; Guimarães, G.B.; Pontes, H.S., 2011. Geossítio do Sumidouro do Rio Quebra-Perna (Ponta Grossa, PR, Brasil): relevante exemplo de sistema cárstico nos arenitos da Formação Furnas. Espeleo-Tema 22, 99-110.
- Morais, F.; Rocha, S., 2011. Cavernas em arenito no planalto residual do Tocantins. Espeleo-Tema 22, 127-137.
- Morais, F.; Souza, L. B., 2009. Cavernas em arenito na porção Setentrional da Serra do Lajeado Estado do Tocantins, Brasil. Revista de Biologia e Ciências da Terra 9, 1-13.
- Ogden, A.E., 1981. Pseudo karst caves of Arkansas. Proceedings of the Eighth International Congress of Speleology 1-2, 766-768.
- Pinheiro, R.V.L.; Maurity, C.W.; Pereira, E., 2015. Cavernas em arenito da Província

- Espeleológica Altamira Itaituba: dados espeleogenéticos com base no exemplo da Gruta das Mãos (PA), Amazônia, Brasil. *Espeleo-Tema* 26, 5-18.
- Pontes, H. S.; Melo, M. S., 2011. Caverna da Chaminé, Ponta Grossa, PR, Brasil: Potencial espeleológico, recursos hídricos subterrâneos e riscos geoambientais. *Espeleo-Tema* 22, 111-126.
- Projeto RADAMBRASIL, 1974. Levantamento de Recursos Naturais Volume 05: Folha SA22 Belém; geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Ministério das Minas e Energia – MME/DNPM, Rio de Janeiro.
- Sallum Filho, W.; Karmann, I., 2007. Dolinas em Arenitos da Bacia do Paraná: evidências de carste subjacente em Jardim (MS) e Ponta Grossa (PR). *Revista Brasileira de Geociências* 37, 551-564.
- Simmert, H., 2010. What is Pseudokarst? In: *Proceedings of the 11th International Symposium on Pseudokarst*, 97-100.
- Sotchava, V. B., 1978. Por uma teoria de classificação de geossistemas da vida terrestre. Instituto de Geografia - USP, São Paulo.
- Sotchava, V. B., 1977. O estudo de geossistemas. Instituto de Geografia - USP, São Paulo.
- Spoladore, A., 2006. A Geologia e a Geoespeleologia como instrumentos de planejamento para o desenvolvimento do turismo - o caso de São Jerônimo da Serra / PR. Tese (Doutorado). Rio Claro, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho.
- Spoladore, A.; Cottas, L. R., 2007. Ornamentos de cavernas areníticas. *Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Espeleologia - Sociedade Brasileira de Espeleologia*, 289-295.
- Sugiuo, K., 2010. Geologia do Quaternário e Mudanças Ambientais. Oficina de Textos, São Paulo.
- Travassos, L.E.P., 2014. Carstologia e a pesquisa científica. *Revista Territorium Terram* 2, 2-14.
- Urban, J., Oteska-Budzyn, J., 1998. Geodiversity of pseudokarst caves as the reason for their scientific importance and motive of protection. *Geologica Balcanica* 28, 163-166.
- Vasques, M. L.; Rosa-Costa, L. T., 2008. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. CPRM, Belém.
- Verissimo, C. U. V.; Spoladore, A., 1994. Gruta do Fazendão (SP-170): considerações geológicas e genéticas. *Espeleo-Tema* 17, 7-17.
- Wernick, E.; Pastore, E. R. B.; Pires Neto, A., 1976. Cavernas em arenito. *Notícia Geomorfológica* 13, 55-67.
- White, W. B., 1988. *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. Oxford University Press, New York.
- Younger, P. L.; Stunell, J. M., 1995. Karst and pseudokarst: An artificial distinction? In Brown, A. G. (Ed), *Geomorphology and Groundwater*. John Wiley, Chichester. pp. 121-142.