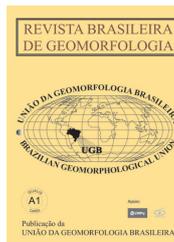




www.ugb.org.br  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 13, nº 4 (2012)



# A IMPORTÂNCIA DO CONTROLE TECTÔNICO PARA A FORMAÇÃO DA PAISAGEM CÁRSTICA NA BACIA POTIGUAR, NORDESTE DO BRASIL

## THE IMPORTANCE OF TECTONIC CONTROL FOR THE FORMATION OF KARST LANDSCAPE IN THE POTIGUAR BASIN, NORTHEASTERN BRAZIL

**Rubson Pinheiro Maia**

*Departamento de Geografia do Centro de Ensino Superior do Seridó – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Rua Joaquim Gregório, Bairro Penedo – CEP: 59300-000 – Caicó (RN), Brasil – e-mail: rubsonpinheiro@yahoo.com.br*

**Maria Osvalneide Lucena Sousa**

*Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Laboratório de Estudos Tectônicos – Núcleo de Estudos do Petróleo e Gás Natural – UFRN – Campus Universitário, Lagoa Nova – CEP: 59.08970 – Natal – (RN) – e-mail: molucena@geologia.ufrn.br*

**Francisco Hilário Rêgo Bezerra**

*Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Av. Senador Salgado Filho – CEP: 59.072-970, Natal (RN), Brasil – e-mail: bezerrafh@geologia.ufrn.br*

**Pedro Xavier Neto**

*Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN – Campus Universitário, Lagoa Nova – CEP: 59.08970 – Natal – e-mail: pedroxn@supercabo.com.br*

**Elissandra Nascimento de Moura Lima**

*Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Campus Universitário, Lagoa Nova – CEP: 59.08970 – Natal – e-mail: enmouralima@gmail.com*

**Carlos César Nascimento da Silva**

*Departamento de Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Av. Senador Salgado Filho – CEP: 59.072-970, Natal (RN), Brasil – e-mail: carloscesar@geofisica.ufrn.br*

**Rafael Duarte Santos**

*PPGG – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Departamento de Geologia, Campus Universitário, Lagoa Nova – CEP: 59.08970 – Natal – (RN) – e-mail: duarte07@gmail.com*

### Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:  
26/05/2012

Data de Aprovação:  
05/10/2012

### Palavras-chave:

Relevo Cárstico, Bacia Potiguar, Tectonismo Cretáceo e Cenozoico.

### Keywords:

Karst Relief, Potiguar Basin, Cretaceous and Cenozoic tectonics.

### Resumo

Na Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil, as unidades cretáceas e cenozoicas apresentam um diversificado mostruário cárstico. Nesta Bacia as feições cársticas mais importantes são as cavernas, dolinas, vales cársticos, canyons e lajedos que ocorrem em rochas carbonáticas da Formação Jandaíra. Essas morfologias são controladas por estruturas deformacionais rúpteis de idade pós-campaniana (70M.a). Assim, o relevo cárstico da Bacia Potiguar é influenciado por falhas e sistemas de juntas nas camadas sedimentares das rochas carbonáticas. Nesse contexto o presente estudo mostra a relação entre geomorfologia cárstica e deformação frágil na Bacia Potiguar. Para tanto, foi analisado o papel dos sistemas de falhas mais importantes no controle da morfologia da bacia. Essas falhas apresentam trend NW-SE e NE-SW e compõem os sistemas Afonso Bezerra, Poço Verde-Caraúbas, Algodão-Juazeiro e Carnaubais. Uma série de relevos cársticos desenvolve-se principalmente orientados nessas direções, sobretudo nas áreas

de influência desses sistemas de falhas e indicam a importância do controle estrutural exercido sobre desenvolvimento da morfologia cárstica da bacia.

## Abstract

The Cretaceous – Cenozoic Potiguar Basin presents one of the most diversified karst landforms in Brazil. The most important geomorphologic karst features in this basin are caves, sinkholes, valleys, canyons and limestone ledges, which occur in carbonate rocks of the Jandaíra Formation. This karst morphology is controlled by the post-Campanian (after 70 Ma) brittle deformation that affects this stratigraphic unit. The karst relief of the Potiguar Basin is the result of the tectonic control of faults, joint systems, and sedimentary layers in the carbonate rocks, which is materialized by the development of exogenic features. The present study shows the relationship between karst geomorphology and brittle deformation in the Potiguar Basin, northeastern Brazil. The most important fault systems that control that morphology are NW-SE- and NE-SW-trending faults such as Afonso-Bezerra, Poço Verde-Caraúbas, Algodão-Juazeiro and Carnaubais. A series of geomorphologic features occur along these fault systems and indicate the importance of the structural control of karst systems in the geomorphologic development of the basin.

## Introdução

Denominam-se cársticas todas as feições erosionais elaboradas pelos processos de dissolução, corrosão e abatimento que ocorrem em rochas solúveis (De Waele *et al.*, 2009, Klimchouck, 2009). As formas cársticas destacam-se por seu modelado ruíniforme (Kohler, 1995). Estas estruturas incluem paredões enrugados e corroídos pelo intemperismo químico, cavernas, sumidouros, lagoas dolinas, e lajedos esculpidos em carbonatos (Carvalho Júnior *et al.*, 2008).

Na região Nordeste do Brasil, o desenvolvimento de morfologias cársticas é influenciado pelo fator climático. Em média com até oito meses de estiagem anual e baixos índices de umidade do ar, que limitam os processos de morfogênese química. Essa característica não favorece, no clima atual, os processos de dissolução de carbonatos relacionados ao intemperismo químico. Contudo, esse fator de limitação não é suficiente para tornar a região desprovida de feições cársticas uma vez que em algumas áreas como a Bacia Potiguar, situada nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará, uma série de relevos cársticos é possível ser identificada. Nesse caso, a morfologia cárstica e os indicadores geológicos de climas passados como os depósitos de tufas calcáreas constituem importantes indicadores paleoclimáticos (Auler *et al.*, 2005, Boggiani *et al.*, 2002). Esses indicadores podem fornecer dados importantes acerca da evolução das paisagens cársticas atualmente submetidas ao clima semiárido. Segundo a base de dados das cavidades naturais subterrâneas do Estado do Rio Grande do Norte, gerenciada pelo núcleo do CECAV (Centro de Estudos, Proteção e Manejo de Cavernas), são registradas 563 cavidades, sendo destas, 469 cavernas, 54 abrigos, 36 abismos e 04 dolinas no Rio Grande do Norte. Esse elevado potencial cavernícola faz do Rio Grande do Norte o sétimo no Brasil e o segundo no nordeste com maior número de cavidades conhecidas, ficando atrás apenas da Bahia. Dessas cavidades 91,5% ocorrem nos calcários da Formação Jandaíra na Bacia Potiguar (Cruz *et al.*, 2010). Tal contexto deve-se à extensa plataforma carbonática da Formação Jandaíra que ocupa uma

ampla superfície da bacia e constitui a maior exposição de rochas calcárias do Brasil. Esta superfície carbonática expressa através de um conjunto de deformações, os eventos rúpteis de idade pós-rifte. Na Bacia Potiguar, os campos de tensões cretáceas e cenozoicas foram responsáveis pelo surgimento de diferentes sistemas de falhas de direção predominantemente NW-SE e NE-SW. Essas falhas ocorrem em superfície e afetam o topo da seção pós-rifte da bacia, exercendo assim importante influência na sua evolução geomorfológica.

Essa morfologia ocorre principalmente na forma de cavernas, dolinas, vales cársticos, canyons, campos de lapiás e lajedos. Trata-se de um conjunto de relevos desenvolvidos segundo as direções dos principais sistemas de falhas regionais que afetam a Bacia Potiguar. Atualmente esses sistemas de falhas exercem importante influência na evolução geomorfológica desta bacia, uma vez que controlam a drenagem e direcionam a dissecação e a deposição de sedimentos quaternários (Moura-Lima *et al.*, 2011; Maia e Bezerra, 2012).

Dessa forma, o objetivo desse trabalho é caracterizar os sistemas de falhas aflorantes nos carbonatos cretáceos da Bacia Potiguar (Figura 1) e mostrar a importância dos sistemas de falhas no condicionamento de feições cársticas, bem como suas implicações para a gênese de cavernas. A área de trabalho é a porção *onshore* da Bacia Potiguar, localizada no extremo nordeste brasileiro, nos Estados do Rio Grande do Norte e leste do Ceará, entre 35° e 38° de longitude oeste e entre 05° e 06° de latitude sul. A área de estudo encontra-se delimitada pela ocorrência dos carbonatos da Formação Jandaíra, sequência pós-rifte da Bacia Potiguar. Esta unidade litoestratigráfica possui até 700m de espessura e extensa distribuição na bacia. Seus afloramentos apresentam geralmente espessuras variando entre 1,0m e 6,0m sendo observados principalmente em margens e leitos de drenagens secas, lajedos e em lavras de exploração mineral. Especificamente, a área de estudo corresponde à porção oeste da bacia, local de ocorrência dos maiores afloramentos da Formação Jandaíra e, portanto várias feições de relevo cárstico.

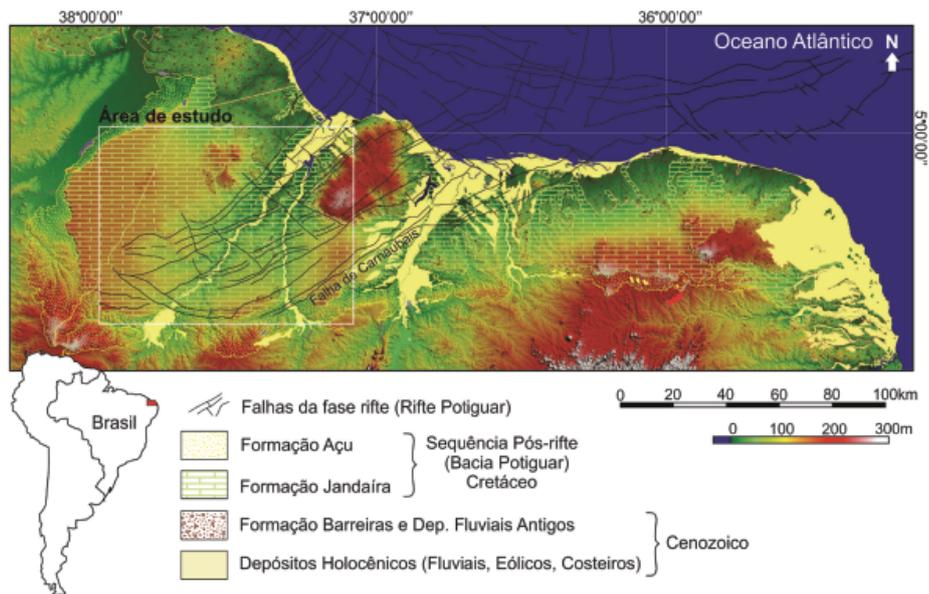


Figura 1 – Mapa da Bacia Potiguar (Unidades cretáceas e cenozoicas sobre SRTM). Edição realizada sobre o Mapa Geológico do Rio Grande do Norte, CPRM, 2006.

### Caracterização Geológica e Ambiental da área de estudo

A Bacia Potiguar encontra-se geneticamente relacionada a uma série de bacias interiores de idade cretácea inferior, que compõem o Sistema de Riftes do Nordeste Brasileiro (Matos, 2000, de Castro *et al.*, 2012). O arcabouço estrutural da bacia é constituído por um conjunto de grábens assimétricos de direção NE-SW separados por *horst* do embasamento. Esta construção estrutural denominada de Rifte Potiguar originou-se a partir do *trend* NE-SW das estruturas dúcteis do embasamento cristalino durante o Cretáceo Inferior (Nóbrega *et al.*, 2005, de Castro *et al.*, 2012). Este rifte é limitado a leste e a oeste pelas falhas Carnaubais e Areia Branca, respectivamente, que constituem um duplo sistema de falhas normais, que teriam se desenvolvido durante a reativação mesozoica de zonas de cisalhamento neoproterozoicas, a partir da abertura do Oceano Atlântico (Matos, 1992).

Na Bacia Potiguar, a partir do Cenozoico, o tectonismo apresenta menor expressividade regional, não determinando o surgimento de riftes e bacias sedimentares, como ocorreu durante o Mesozoico. Contudo, ocorreram no Cenozoico eventos como a reativação de importantes falhamentos (Sistemas de Falhas de Carnaubais e Afonso Bezerra) (Moura-Lima *et al.*, 2010 e 2011), dobramentos com grande comprimento de onda e eixos orientados na direção N-S, resultantes de esforços compressivos E-W que afetaram essa bacia no Paleógeno (Cremonini, 1993), e reativações

tectônicas associadas a intrusões básicas relacionadas com a Formação Macau (Knesel *et al.*, 2011).

As falhas da porção central e oeste da Bacia Potiguar já são bem conhecidas. Elas incluem principalmente os sistemas de falhas Afonso Bezerra (direção NW) e Carnaubais (direção NE) (Figura 2). O sistema Afonso Bezerra é composto por falhas de transferência, enquanto o sistema de falhas Carnaubais resulta da reativação da zona de cisalhamento Portalegre, que ocorreu na abertura do Atlântico (de Castro *et al.*, 2012). Essas falhas assumem importante papel na definição dos padrões de drenagem que constituem um dos principais parâmetros na identificação de movimentos neotectônicos. Esses movimentos são induzidos principalmente por falhas reativadas durante o Cenozoico, a partir do regime compressivo no qual se situa a margem do Nordeste equatorial brasileiro (Bezerra e Vita Finzi, 2000).

Dois campos de tensões que atuaram no Paleógeno e outro do Neógeno ao Quaternário foram identificados por Bezerra e Vita Finzi (2000) e Bezerra *et al.* (2011), a partir da análise de dados de campo, mecanismo focal e *breakout*. O primeiro campo foi caracterizado por esforços compressivos de direção aproximada N-S e distensão E-W; o segundo campo é caracterizado por compressão de direção que varia de NW-SE e distensão NE-SW na parte central da Bacia Potiguar a compressão E-W e distensão N-S na porção leste da bacia. Esse último campo afeta todas as unidades litoestratigráficas e é o único campo de tensões cujos efeitos são observados na Formação Barreiras e em sedimentos quaternários. Segundo esses autores a cinemática das falhas é caracterizada por falhas transcorrentes dextrais NE-SW, sinistrais NW-SE, falhas normais e juntas de direção E-W.

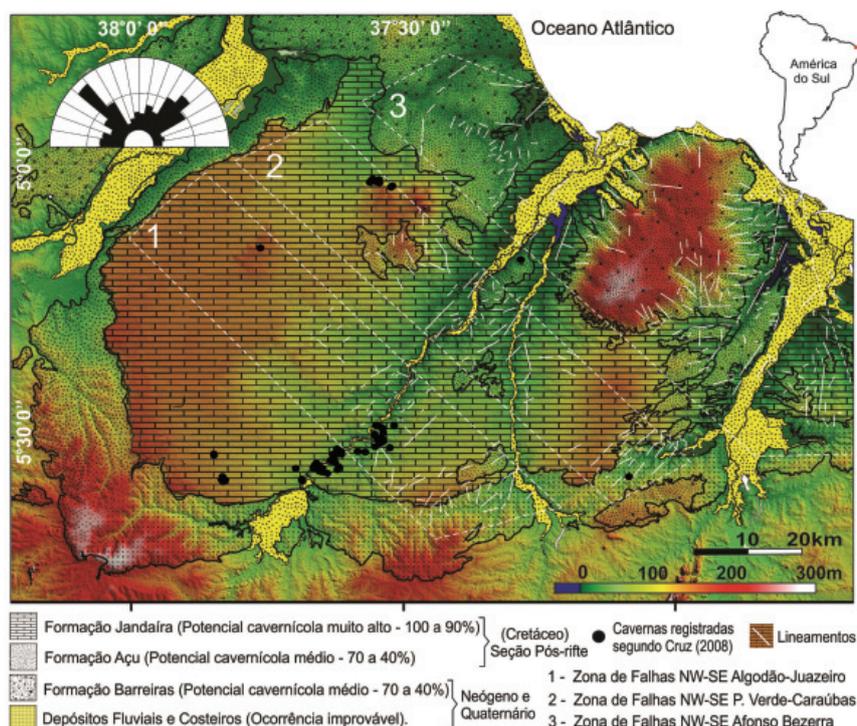


Figura 2 – Mapa Geológico sobre Relevo e potencial de ocorrência de cavernas da parte central da Bacia Potiguar. Tracejados brancos representam as Zonas de Falhas NW-SE. Dados de potencial de ocorrência de cavernas segundo Cecav 2008.

O presente estudo enfoca a fase Drifte da Bacia Potiguar que ocorreu a partir do apogeu de uma transgressão entre o Cenomaniano (99,6 a 93,6 Ma) e o Turoniano (93,6 a 88,6 Ma), sendo marcada pelo afogamento dos sistemas fluviais da Formação Açú, bem como pela implantação de uma ampla plataforma carbonática denominada de Formação Jandaíra (Soares *et al.*, 2003). Os carbonatos da Formação Jandaíra têm, em geral, coloração acinzentada (calcários dolomitizados e dolomitos) a creme-clara (calcários), com textura variando de fina a grossa. Sua deposição ocorreu no período que varia do Turoniano (93,6 a 88,6 M.a) ao Eocampaniano (83,5 a 70,6 M.a), no final do período de formação da sequência transgressiva, em condições de deriva continental e mar aberto (Araripe e Feijó, 1994).

A Formação Jandaíra representa a mais extensa área de afloramento de carbonatos fanerozoicos do Brasil. As rochas da Formação Jandaíra constituem uma rampa carbonática que aflora em praticamente toda a porção emersa da Bacia Potiguar. Esta rampa carbonática foi submetida, durante e após sua deposição, a diversos episódios de soerguimento provocando exposição subaérea e erosão que resultaram em intensa carstificação e dissolução. A carstificação da Formação Jandaíra possui importante condicionamento estrutural, notadamente dos tensores tectônicos que atuaram após sua deposição, ao final do Campaniano. A tectônica pós-campaniana está impressa no carste da Formação Jandaíra como falhas, fraturas e blocos elevados que propicia

o rejuvenescimento do perfil hidrodinâmico, favorecendo e condicionando a espeleogênese em diversos níveis estratigráficos. A carstificação desenvolvida na Formação Jandaíra é essencialmente epigênica, e os planos de falhas e fraturas servem como condutos para a percolação de águas meteóricas que promovem a dissolução da rocha carbonática (Xavier Neto *et al.*, 2008).

A área de estudo está situada no domínio do clima semiárido do tipo BSW'h, segundo a classificação de Köppen (RADAMBRASIL, 1981), que caracteriza-se pela predominância das altas temperaturas associadas a um regime de chuvas esporádicas, concentradas principalmente nos quatro primeiros meses do ano. Segundo Nimer (1989), o clima semiárido é influenciado pela zona de convergência intertropical, com período seco de junho a janeiro e úmido de fevereiro a maio. O sistema de chuvas é controlado principalmente por diversos mecanismos aos quais se destacam as frentes frias, a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e dos Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (VCAS) e as ondas de leste (Nobre, 1994). A precipitação pluviométrica média é em torno de 700 mm anuais e a temperatura em torno de 27° C, com mínima de 21° C e máxima de 36° C. A umidade relativa do ar ao longo do ano na região é em média 70% e acompanha a curva de precipitação pluviométrica, com maiores valores observados de fevereiro a maio e valores menores de junho a janeiro (IDEMA, 2002).

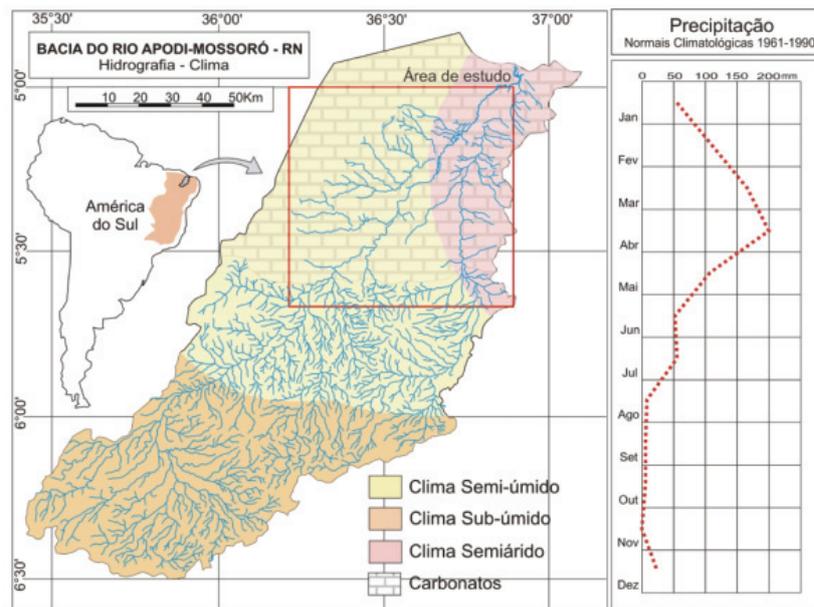


Figura 3 – Caracterização hidro-climática da área de estudo. Normais Climatológicas baseadas em SEMARH (2000). O setor marrom na área da América do Sul representa a área de influência do clima semiárido.

Do ponto de vista hidrográfico a área de estudo se situa no baixo curso da bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró (Figura 3). Nesse setor a diminuição da densidade dos canais se dá em função da maior permeabilidade do substrato constituído pelos carbonatos da Formação Jandaíra. De modo distinto ao que ocorre no alto curso, ao sul da área de estudo, a elevada densidade de drenagem resulta de sua relação com o embasamento pré-cambriano.

No baixo curso, os sistemas de falhas NW-SE (Sistema de falhas Afonso Bezerra) e NE-SW (Sistema de Falhas de Carnaubais) da Bacia Potiguar condicionam uma drenagem tipo paralela orientada no sentido NE-SW, para canais principais (3° e 4° ordem) e NW-SE para tributários (1° e 2° ordem). Os efeitos das estruturas rúpteis na drenagem constituem importantes evidências de controle estrutural e reativação pós-rifte.

## Metodologia

A metodologia deste trabalho consistiu em levantamento bibliográfico, interpretação de produtos de sensoriamento remoto e trabalho de campo. Neste último, foi realizado o registro fotográfico, a descrição das feições cársticas e a obtenção de medidas estruturais objetivando a caracterização de fraturas e *sets* de juntas só visíveis em escala de afloramento. A análise das feições geológicas/geomorfológicas da área de estudo foi realizada com base em imagens de satélite com resolução espacial de 15 m (Imagem *Landsat 7-ETM+*, no modo pancromático e sintético com o modo multiespectral), de 5 m (fotografias aéreas) e imagens geradas pela *shuttle*

*radar topographic mission* (SRTM). O processamento, estudo e georreferenciamento das imagens foram feitos com o uso do *software* ARCGIS 9.3. Para o mapeamento de detalhe do relevo cárstico foram usados produtos de sensores remotos com uma resolução espacial máxima de 1 m (imagens do satélite IKONOS Merge com Fusão Digital Multi+Pan - 3 bandas) e *Quick-Bird*, que foram processadas com filtragem direcional para melhor identificação de feições frágeis.

O tratamento das imagens *Landsat 7 ETM+* foi realizado utilizando-se os *softwares* *Envi 4.0* e o *ArcGis 9.3*. As imagens foram submetidas a técnicas de combinação de cenas no sistema RGB, entre as bandas espectrais para obtenção de melhores composições coloridas, que favorecessem a distinção visual das diferentes unidades litoestratigráficas, geomorfológicas e dos aspectos estruturais. A partir da imagem SRTM foi possível obter o modelo digital de elevação para algumas porções das áreas estudadas e o sombreamento artificial do relevo (*Hillshade*). A integração dos dados de imagens *Landsat 7 ETM+* e SRTM tornou possível uma apresentação tridimensional dos dados digitais de elevação do terreno.

## Resultados e discussões

### Tectônica Pós-rifte e Falhas na Bacia Potiguar

A tectônica cretácea e cenozoica que atuou na área de estudo é representada por estruturas macro e mesoscópicas identificadas nas rochas da Formação Jandaíra. O traçado das estruturas na área de pesquisa comporta-se como enxames de lineamentos da ordem de metros

a alguns quilômetros com importante potencial cavernícola. A análise de produtos de sensoriamento remoto permitiu observar que os lineamentos traçados a partir das imagens digitais apresentam orientação segundo as direções NE-SW, E-W e N-S. Entretanto, há predomínio da direção NW-SE, relacionada aos sistemas de falhas Afonso Bezerra, Poço Verde-Caraúbas e Algodão-Juazeiro (Figura 2).

A extração e interpretação destes lineamentos, associados aos dados obtidos em campo, permitiram comprovar a expressão em superfície destes sistemas de falhas. Os grandes lineamentos de orientação NW-SE apresentam nítido controle na ocorrência dos depósitos quaternários. Cristas e vales de drenagens, que expõem rochas da Formação Jandaíra também ocorrem alinhados segundo esta orientação. A ocorrência de silicificação nos calcários da Formação Jandaíra produz lineamentos marcados por altos topográficos. Os lineamentos NW-SE são marcados principalmente por canais de drenagem secundários dos rios Apodi-Mossoró e Açu.

Os lineamentos NE-SW são correlacionáveis ao Sistema de Falhas Carnaubais e outras falhas paralelas. Estas falhas apresentam forte indício no controle da orientação dos dois grandes rios da região (rios Apodi-Mossoró e Açu), que expõem rochas da Formação Jandaíra. A drenagem tipo paralela orientada no sentido NE-SW, para canais principais (3° e 4° ordem), e NW-SE

para tributários (1° e 2° ordem) é também condicionada pelas falhas NE-SW e NW-SE. Diversos cotovelos de drenagem interrompem o paralelismo NE-SW, formando segmentos NW-SE e constituem importantes evidências de reativação quaternária (Maia e Bezerra, 2012). Essas falhas documentam um campo de tensões relacionado a uma compressão NE-SW e extensão NW-SE compatível com um regime transcorrente sinistral para as falhas dos Sistemas Afonso Bezerra, Poço Verde-Caraúbas e Algodão-Juazeiro. É importante destacar que algumas estruturas não observadas em imagens de satélite estão presentes na escala de afloramento ou fotografias de detalhe e do ponto de vista “cárstico” são igualmente importantes, pois conectam diferentes *sets* de fraturas, tanto horizontal, como vertical. Baseado nas observações de campo percebe-se que todo o calcário aflorante mostra-se deformado, em regime rúptil, sendo marcado por rupturas que variam de centímetros a centenas de metros.

Devido às grandes falhas, os calcários foram afetados por processos de silicificação e ainda sofreram um processo a mais, a brechação hidráulica (Moura Lima *et al.*, 2011). A silicificação e brechação das rochas carbonáticas são facilmente reconhecidas em campo, já que estes processos conferem à rocha maior resistividade à erosão, o que proporciona a sobressaliência destas feições em meio a um relevo relativamente plano, característico do interior de planícies sedimentares (Figura 4).



Figura 4 – Crista residual na Formação Jandaíra formada pela erosão diferencial resultante da silicificação do calcário em plano de falha. As setas brancas indicam o posicionamento linear do afloramento.

Dois tipos de preenchimento sedimentar ocorrem ao longo das falhas dissolvidas. O primeiro é representado pelas brechas de colapso (*collapse* ou *chaotic breccias*) e é composto por fragmentos que caem da parede das falhas ou do teto de cavernas após carstificação. As brechas de colapso são pobremente selecionadas e são geralmente clastos suportados. Os clastos variam de *boulder* a seixos e a matriz é composta por fragmentos de fração granulométrica areia a silte. O segundo tipo de preenchimento são sedimentos detríticos aluviais derivados de rios próximos e de degradação de escarpas de falhas, e que foram transportados em tração ou

suspensão para serem depositados ao longo de falhas abertas pela dissolução.

### Morfologia cárstica

A porção emersa da Bacia Potiguar constitui uma cuesta (Figura 5) que se estende pelo segmento oeste do Estado do Rio Grande do Norte e o extremo leste do Estado do Ceará, com *front* voltado para S e SW e reverso para NE e com inclinação de 0,1°. No *front*, a cornija íngreme é sustentada

por rochas carbonáticas da Formação Jandaíra, com somital de aproximadamente 140 m. A solubilidade das rochas carbonáticas nessa área não favorece a formação de depósitos de tálus na interface entre o *front* e a depressão periférica que a bordeja. Na base, o *front* forma uma rampa com inclinação

muito variável moldada nos arenitos da Formação Açú. Esse setor apresenta dissecação incipiente realizada por canais de 1° e 2° ordem dos tipos anaclinais e ortoclinais em direção à Depressão Sertaneja que limita a área do embasamento Pré-cambriano e a Bacia Sedimentar.

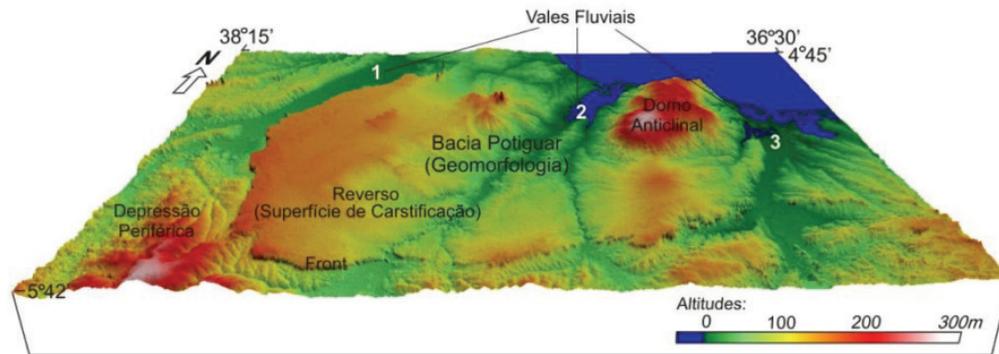


Figura 5 – Geomorfologia da Bacia Potiguar (Bloco Diagrama) 1: Vale do Rio Jaguaribe, 2: Vale do Rio Apodi-Mossoró, 3: Vale do Rio Açú.

O relevo cárstico pode ser definido na ocorrência de zonas externas ou exocarstes, zonas de contato da rocha com o solo, ou epicarstes, e a zona subterrânea, denominada endocarstes (Klimchouck, 2009). Destas, cada uma ainda pode ser dividida entre as formas positivas e as formas negativas. As morfologias cársticas positivas são todas aquelas que a partir da erosão e corrosão lateral permaneceram como resquício, um testemunho de uma antiga superfície cárstica erodida.

Na Bacia Potiguar a expressão em superfície das deformações rúpteis relacionadas aos últimos campos de tensões

tem influenciado a evolução do relevo cárstico em todas as formas, sejam dos tipos endocársticas ou exocársticas. Essa influência se dá através do controle estrutural de drenagem, favorecendo nesses setores o desenvolvimento localizado de morfologias ruíniformes. Nesse aspecto, os controles estruturais e tectônicos são importantes no condicionamento morfológico e direcional de várias feições cársticas, como dolinas, cavernas e vales (Auler, *et al.*, 2005).

Como resultado do condicionamento lito-estrutural tem-se a formação de vales incisivos orientados segundo as direções de falhamento (Figura 6).



Figura 6 – Fraturada alargada (Lajedo Soledade, Apodi – RN).

A confluência desses canais origina vales incisos onde é possível identificar formas do tipo endocársticas como as cavernas e exocársticas como dolinas e canyons. Trata-se de um conjunto de relevos desenvolvidos segundo as direções dos principais sistemas de falhas regionais que atualmente exercem o controle estrutural da drenagem e portanto, na dissecação.

O padrão morfológico dos condutos formados a partir da dissecação fluvial é linear ao longo das falhas sendo que os condutos maiores ocorrem na interseção das mesmas (Figura 6).

Sobre os lajedos da Formação Jandaíra, os padrões de drenagem são principalmente do tipo paralela e treliça (Figura 7). Esses padrões podem ser identificados por meio de sensoriamento remoto na forma de lineamentos topográficos negativos, expressos em campo na forma de vales incisos ou lapiás. Contudo suas terminações são difíceis de identificar uma vez que comumente drenam seus deflúvios para sumidouros assumindo a partir destes, um padrão endógeno de circulação.

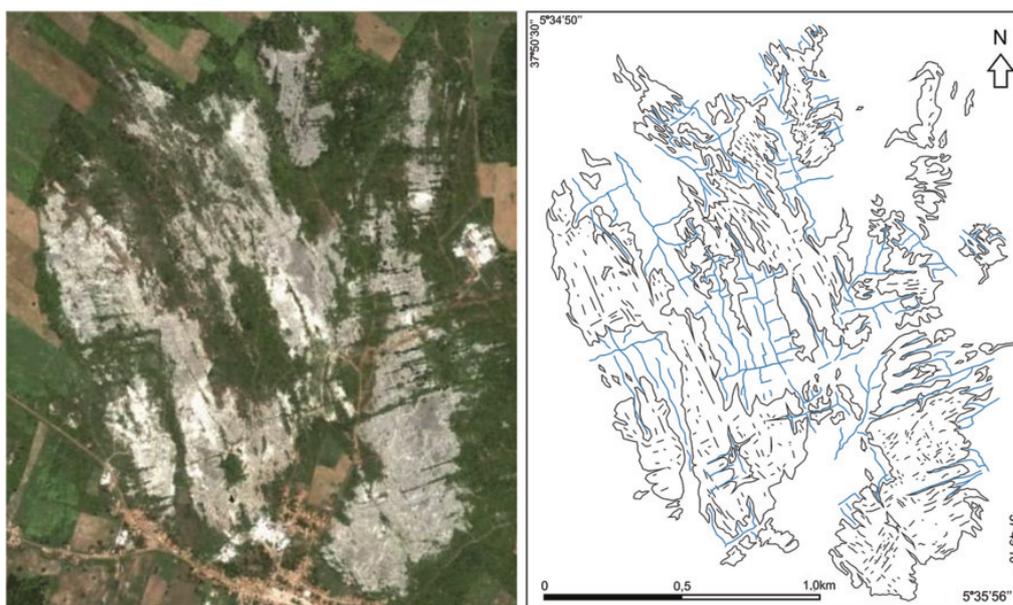


Figura 7 – Imagem de Satélite Quick Bird (2000) e rede de drenagem no Lajedo Soledade. A área da imagem corresponde ao quadrante D da Figura 9.

Na área dos lajedos, os carbonatos da Formação Jandaíra formam extensos campos de lapiás individualizados por canyons (fraturas alargadas). Nesse setor, os carbonatos ocorrem principalmente na forma de calcários, calcários dolomitizados e dolomitos (Bezerra *et al.*, 2012) com textura variando de grossa a fina. Esse padrão textural é expresso nas paredes das fraturas alargadas como um conjunto de feições erosionais que seguem os planos de estratificação. Essas feições são mais pronunciadas nas fácies mais finas e portanto mais friáveis. Nessas fácies originam-se cavidades horizontais lineares que passam a exibir geomorfologicamente além das classes texturais a arquitetura estratigráfica dos carbonatos aflorantes (Figura 8). Já em superfície, as direções dos lapiás assumem dois padrões distintos. Um do tipo difuso, sem nenhum controle aparente da morfologia por parte da litologia ou da estrutura. O segundo padrão, caracteriza-se por cristas remanescentes lineares que adequam-se as linhas de fraqueza estrutural representadas por fraturas e *sets* de

juntas. Neste caso, os lapiás são caracterizadas por uma sequência de cristas paralelas individualizadas por feições lineares reentrantes que canalizam o deflúvio acelerando a corrosão química nesses setores. A manutenção das cristas ocorre em virtude da diferença litológica uma vez que constituem fraturas preenchidas por calcita e esta representa um fator de resistência à corrosão química. Essas cristas ocorrem principalmente em escala centimétrica chegando à escala decimétrica.

A Formação Jandaíra é marcada por elevado grau de deformação tectônica. A origem das cavernas está diretamente ligada às falhas da Bacia Potiguar evidenciada pela direção das principais galerias. Como exemplo, tem-se a caverna Arapuá (Figura 9 Foto - B1) que coincide com o *trend* regional, ou seja, distribui-se segundo as direções NW-SE e NE-SW. Aliado ao fator estrutural, as cavernas se formam porque o calcário é uma rocha solúvel frágil à acidez e ao encontrar um ambiente extremamente fra-

turado e poroso, como é o caso da Formação Jandaíra, as novas superfícies criadas a partir do fraturamento passam a ser potenciais superfícies de carstificação (Gomes *et al.*, 2011). Nesses casos a formação de condutos é controlada pela solubilidade da rocha e seu padrão estrutural. Com

base nas evidências de campo é possível constatar que a presença de estruturas NW-SE e NE-SW exerce forte controle e influencia diretamente na formação de cavidades subterrâneas, uma vez que estas direções coincidem com a direção preferencial das cavernas.

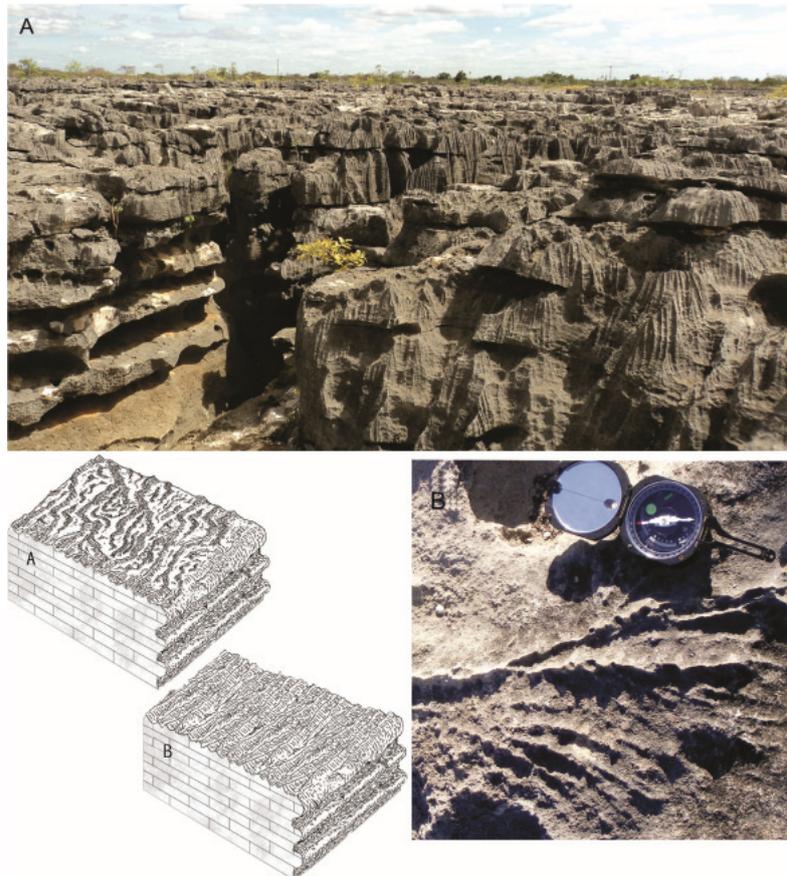


Figura 8 – Visão Geral de um lajedo exibindo em superfície extenso campo de lapiás. Nas escarpas das fraturas alargadas é possível identificar reentrâncias erosionais resultantes da erosão diferencial.

A orientação de falhas, fraturas e juntas também condicionam o trabalho de dissecação e formação de feições exocársticas. Estas estruturas facilitam o acesso da água no interior das rochas acelerando seu desgaste químico. Dessa forma, zonas fraturadas potencializam a ação erosiva formando feições cársticas orientadas conforme as direções de falhamento. Na Bacia Potiguar, os sistemas de falhas de direção NE-SW e NW-SE documentam os efeitos dos últimos campos de tensões cenozoicos.

Os efeitos das reativações tectônicas pós-rifte podem ser observados a partir de indicadores geológicos

como falhas preenchidas por tufas calcárias ou calcita e estilólitos verticais. Do ponto de vista geomorfológico, as falhas normais, dolinas de colapso ou de dissolução e os vales incisivos orientados em linhas de falhas constituem os principais morfoindicadores de tectonismo na bacia.

Sobre os carbonatos da Formação Jandaíra, as falhas condicionam o desenvolvimento de um sistema de drenagem angular dos tipos treliça e retangular. Essa drenagem disseca os carbonatos originando vales incisivos de direção NW-SE e NE-SW. As fraturas métricas, por sua vez, encaixam a rede hidrográfica atual (Figuras 6, 7, 10A e 10B).

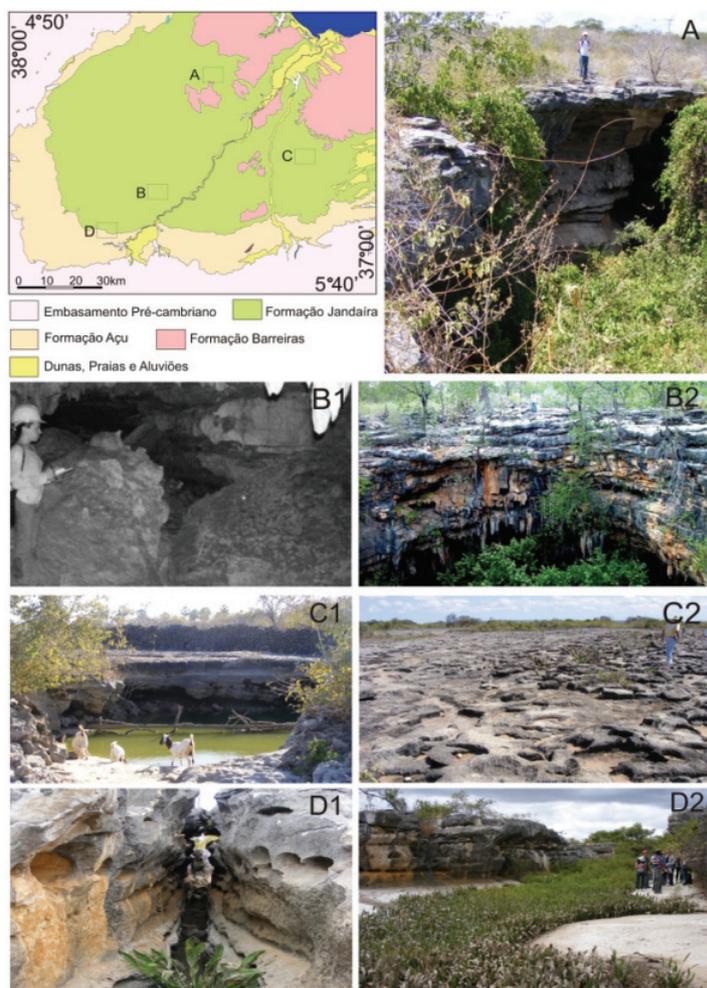


Figura 9 – Mapa da ocorrência de feições cársticas da Bacia Potiguar. (Fonte das Fotos B1 e B2: Gomes et al., 2011, Fotos A, C1, C2, D1 e D2 do autor) Foto A, Furna Feia em Baraúna, RN. Foto B1, Caverna Arapuá em Felipe Guerra-RN. Foto B2, Dolina em Felipe Guerra-RN. Foto C1, Dolina em Açú-RN. Foto C2, Lajedo em Açú-RN. Foto D1, Fratura alargada em Soledade-RN. Foto D2, Vale cárstico em Soledade-RN.



Figura 10 – (Foto A – Vale Inciso estrutural) (Foto B – Fratura em fase inicial de alargamento) (Foto C – Juntas preenchidas por Calcita)

Na área de estudo, os pontos que exibem evidências de carstificação são desprovidas de cobertura pedológica. Tal fato permite constatar que os processos erosivos associados a essas áreas suplantaram a pedogênese que ocorre extensivamente na superfície da Bacia Potiguar. Nesse aspecto, delgados solos do tipo Cambissolos Eutróficos e Rendzinas (Chernossolos) distribuem-se na área de pesquisa nos locais menos afetados pelo tectonismo cenozoico. Como as estruturas frágeis condicionaram a ação erosiva preferencialmente segundo os planos de falhas e fraturas, as áreas com mais evidências de carstificação tiveram, em termos genéticos, sua pedogênese superada pela morfogênese físico-química representada pelos deflúvios superficiais e subterrâneos confinados pelas estruturas rúpteis rasas. Dessa forma, a superfície dos lajedos apresenta de forma extensiva um conjunto de morfologias associadas à dissecação fluvial. Desse conjunto destacam-se as pequenas ravinhas esculpidas pelo escoamento superficial que conferem um aspecto rugoso a superfície do lajedo.

Do elevado número de feições cársticas da Bacia Potiguar os vales estruturais são os que possuem ocorrência mais frequente. Estes vales originam lineamentos que se refletem na topografia da região como feições retilíneas relacionadas aos sistemas de falhas regionais reativados no Cenozoico. Nesse contexto, os eventos deformacionais pós-rifte foram de grande importância para a origem e evolução do relevo cárstico na bacia, uma vez que o padrão de deformação estrutural condiciona a ação intempérica, representada principalmente pela dissecação fluvial, resultando em morfologias lineares que refletem em suas direções os campos de tensões cenozoicos responsáveis pelas reativações tectônicas.

## Conclusões

Na área de estudo, os processos erosivos atuais são controlados, sobretudo, pela morfogênese física condicionada pela semiaridez climática uma vez que a morfogênese química só ocorre no período úmido, limitada ao período de fevereiro a maio. Nesse período, uma densa rede de canais desenvolve-se sobre os carbonatos, adaptando-se às estruturas rúpteis pré-existentes como falhas e *sets* de juntas.

As fraturas são o ponto de partida para o desenvolvimento de porosidade secundária (do tipo fissural) dessa rocha. É através delas que a água inicia sua atuação de desagregação lenta e contínua da rocha, passando a longo prazo, de microporosidade às cavidades subterrâneas.

Além do controle estrutural representado pelas falhas, fraturas e *sets* de juntas o controle epigênico relacionado ao nível de base torna ainda mais evidente o condicionamento tectônico uma vez que a dissolução dos carbonatos só ocorre com maior intensidade nos períodos úmidos. Nesses períodos, as fendas estruturais nos carbonatos canalizam o deflúvio que

passam a desenvolver incisões e estas realçam do ponto de vista geomorfológico a trama estrutural vigente.

Esse contexto climático, onde as precipitações são concentradas em um curto período de tempo, limita a dissolução dos carbonatos em solução aquosa, existente entre gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), íons bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) e carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (Carvalho Júnior, *et al.*, 2008). Dessa forma, a morfogênese química associada aos cursos fluviais, está limitada a canais intermitentes sazonais que no período chuvoso possuem elevada competência erosiva e descarga sólida e no restante do ano constituem vales secos.

Na Bacia Potiguar é possível encontrar vales cársticos em diferentes fases evolutivas conforme demonstrado nas Figuras 6 e 9. Esses vales foram formados pela dissolução dos carbonatos em fraturas que resultou no rebaixamento linear da superfície constituindo assim vales incisos. Esses vales incisos constituem importantes indicadores de reativação pós-rifte uma vez que suas direções seguem a orientação de falhas que afetam a Formação Jandaíra na Bacia Potiguar. Essas falhas, de direção NE-SW e NW-SE têm exercido importante papel no desenvolvimento de morfologias cársticas uma vez que a sazonalidade da drenagem condiciona a dissecação linear dos carbonatos que passam a exibir uma complexa rede de ravinamentos e vales incisos em superfície.

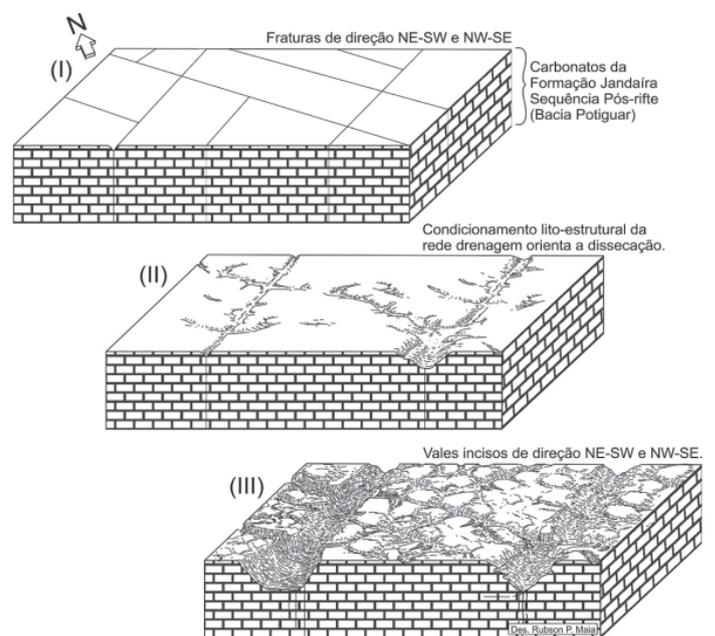


Figura 11 – Evolução do modelado cárstico a partir de superfície fraturada.

A história evolutiva da Bacia Potiguar é marcada por reativações tectônicas as quais originaram um complexo sistema de falhas na Formação Jandaíra. Em muitos casos esses sistemas de falhas apresentam expressão geomorfo-

lógica e são passíveis de observação em campo, bem como por imagens de satélite e fotografias aéreas. Atualmente, tais falhas também exercem importante influência na evolução geomorfológica da bacia, que passa a expressar no relevo a complexa trama estrutural vigente.

O tectonismo pós-rifte apresenta diversas evidências de reativação cenozoica expressa em superfície como feições de relevo e de drenagem e em estruturas rasas identificadas em campo. Essas estruturas são formadas invariavelmente pela solubilidade dos carbonatos a partir de um padrão estrutural condicionado pelos sistemas de falhas regionais da Bacia Potiguar. Esses sistemas de falhas, reativados no Cenozoico, tem exercido importante influência na definição do modelado cárstico da bacia.

Esse modelado inclui amplos e extensos lajedos fraturados, campos de lapiás relacionados aos lajedos fraturados em fases erosivas mais avançadas, dolinas de colapso, vales incisos e ravinhas desenvolvidas a partir do alargamento dos planos de falhas.

#### Referências bibliográficas

- ARARIPE, P.T.; FEIJÓ, F.J. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências**, Rio de Janeiro, v.8, n.1, 1994.
- AULER, A. S.; PILÓ, L. B.; SAADI, A. Ambientes cársticos. In: Souza, C.R.G; Suguio, K; Oliveira, A.M.S; Oliveira, P.E. (Org.). **Quaternário do Brasil**. Ribeirão Preto: Holos, 2005. p. 321-342.
- BEZERRA, F. H. R.; VITA-FINZI, C. How active is a passive margin? Paleoseismicity in Northeastern Brazil. **Geology**, v. 28, p. 591-594, 2000.
- \_\_\_\_\_; SRIVASTAVA, N.; SOUZA, M. O. L.; **Relatório do Mapeamento Geológico Regional: Folha SB-24-X-D-I** (1:100.000) Contrato CPRM-UFRN Nº 59/PR/08. Natal, RN, 2012.
- \_\_\_\_\_; DO NASCIMENTO, Aderson F.; FERREIRA, J. M.; NOGUEIRA, F. C.; FUCK, R. A.; NEVES, benjamim b. Brito; SOUSA, Maria O.L. Review of active faults in the Borborema Province, Intraplate South America Integration of seismological and paleoseismological data. **Tectonophysics** (Amsterdam), v. 510, p. 269-290, 2011.
- BOGGIANI, P.C.; COIMBRA, A.M.; GESICKI, A.L.; SIAL, A.N.; FERREIRA, V.P.; FLEXOR, J.M.; Tufas Calcárias na Serra da Bodoquema, MS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., 2002. **Anais ...** 2002. 607-617.
- CARVALHO JUNIOR, O. A; BERBET-BORN, M; MARTINS, E. D; GUIMARÃES, R. F; GOMES, R. A. T. Ambientes Cársticos In: FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia: Conceitos e Tecnologias Atuais**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- CENTRO DE ESTUDOS, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Relatório demonstrativo da situação atual das cavidades naturais subterrâneas (Rio Grande do Norte)**. Brasília, 2008.
- CREMONINI, O. A. **Caracterização estrutural e evolução da área de Ubarana, porção submersa da Bacia Potiguar, Brasil**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1993.
- CRUZ, J. B. **Levantamento Espeleológico: Prospecção, identificação e caracterização de cavidades naturais subterrâneas no lajedo do Arapuá, Felipe Guerra/RN, tendo como suporte as geotecnologias**. Monografia (Graduação em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.
- \_\_\_\_\_; BENTO, M.D.; BEZERRA, F.H.R.; FREITAS, J.I.; CAMPOS, U.P.; SANTOS, D.J; Diagnóstico Espeleológico do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Espeleologia**, v. 1, n. 1, 2010.
- DE CASTRO, D. L.; BEZERRA, F. H.R. ; SOUSA, MARIA O.L.; FUCK, R. A. Influence of Neoproterozoic tectonic fabric on the origin of the Potiguar Basin, northeastern Brazil and its links with West Africa based on gravity and magnetic data. **Journal of Geodynamics**, v. 54, p. 29-42, 2012.
- DE WAELE, J. D; PLAN, L; AUDRA, P. Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: An introduction. **Geomorphology**, v. 106, p. 1–8, 2009.
- GOMES, I.P; VERÍSSIMO, C.U.V.; BEZERRA, F.H.R.; As fraturas e sua importância no controle da paisagem cárstica em calcários da Formação Jandaíra (cretácio da bacia potiguar), Felipe Guerra – RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 31., Paraná. **Anais ...** Paraná : Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2011.
- INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE DO RIO GRANDE DO NORTE. **Caracterização do clima, solo, vegetação, relevo, recursos hídricos e aspectos sócio-econômicos do município de Mossoró**. 2002. Disponível em: <[www.idema.rn.gov.br/perfil\\_g.asp](http://www.idema.rn.gov.br/perfil_g.asp)>. Acesso em : fev. 2012.
- KLIMCHOUCK, A. Morphogenesis of hypogenic caves. **Geomorphology**, v. 106, Issues 1-2, p.100-117, 2009.
- KNESEL, K. M.; SOUZA, Z. S.; VASCONCELOS, P. M. P.; COHEN; SILVEIRA, F. V. Young volcanism in the Borborema Province, NE Brazil, shows no evidence for a trace of the Fernando de Noronha plume on the continent. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 302, p. 38-50, 2011.
- KOHLER, H. G. Geomorfologia Cárstica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia : Uma atualização de Bases e Conceitos**. 2. ed. Rio de Janeiro : Bertrand Brasil, 1995.
- MAIA, R. P.; BEZERRA, F.H.B. Geomorfologia e Neotectônica da Bacia Hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró NE/Brasil. **Mercator** (Fortaleza. Online), v. 11, p. 209-228, 2012.
- MATOS, R. D. M. Tectonic evolution of the equatorial south atlantic, in: Atlantic Rift in Continental Margins. **American Geophysical Union**, p.331-351, 2000.

- \_\_\_\_\_. The Northeast Brazilian Rift System. **Tectonics**, v. 11, n. 4, p. 766-791, 1992.
- MOURA-LIMA, E.N.; BEZERRA, F. H. R.; LIMA-FILHO, F. P.; DE CASTRO, DAVID L.; SOUSA, MARIA O.L.; FONSECA, V.P.; AQUINO, M. R. 3-D geometry and luminescence chronology of Quaternary soft-sediment deformation structures in gravels, northeastern Brazil. **Sedimentary Geology**, v. 235, p. 160-171, 2011.
- \_\_\_\_\_; SOUSA, M. O. L.; BEZERRA, F. H. R.; DE CASTRO, D. L.; DAMASCENA, R.V.C.; VIEIRA, M. M.; LEGRAND, J. M. Reativação Cenozóica do Sistema de Falhas de Afonso Bezerra, Bacia Potiguar. **Geociências** (São Paulo. Online), v. 30, p. 77-93, 2011.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989.
- NOBRE, P. **Clima e Mudanças Climáticas no Nordeste, Projeto Áridas, Ministério da Integração Nacional**, v. 1, n. 1, 1994.
- NÓBREGA, M. A.; SA, J. M.; BEZERRA, F. H. R.; HADLER NETO, J. C.; IUNES, P. J.; OLIVEIRA, S. G.; SAENZ, C. A. T.; LIMA FILHO, F. P. The use of apatite fission track thermochronology to constrain fault movements and sedimentary basin evolution in northeastern Brazil. **Radiation Measurements**, Amsterdam, v. 39, p. 627-633, 2005.
- RADAMBRASIL. **Folhas SB-24/25 Jaguaribe/Natal: Geologia e mapeamento geológico, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação e Uso potencial da terra**. Rio de Janeiro, 1981. 774 p. (Levantamento de recursos naturais, 23).
- RIO GRANDE DO NORTE. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Recursos Hídricos: Bacia do Apodi-Mossoró**. Natal, 2000.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa de Geologia do Rio Grande do Norte, Shapes e SIG**. 2006. CD-ROM.
- SOARES, U. M.; ROSSETTI, E. L.; CASSAB, R. C. T. Bacia Potiguar. Fundação Paleontológica Phoenix. **Bacias Sedimentares Brasileiras**, Ano 5, n. 55, 2003.
- XAVIER NETO, P., BEZERRA, F.H.R., SILVA, C.C.N. DA E CRUZ, J.B. O condicionamento estrutural do carste Jandaíra e da espeleogênese associada pela tectônica pós-campaniana da Bacia Potiguar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 44., Curitiba. **Anais...** 2008. CD-ROM.