

## Imageamento digital de paleocavernas colapsadas com *ground penetrating radar*

### *Ground penetrating radar digital imaging of a collapsed paleocaves*

Thales Eduardo Silva de Jesus<sup>1</sup>, João Andrade dos Reis Júnior<sup>1</sup>, David Lopes de Castro<sup>2</sup>,  
Francisco Pinheiro Lima-Filho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Caixa Postal 1.596, Lagoa Nova, CEP 59078-970, Natal, RN, BR (thalesjesus@hotmail.com; junioreis03@yahoo.com.br)

<sup>2</sup>Departamento de Geologia, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, RN, BR (david@geologia.ufrn.br; pinheiro@geologia.ufrn.br)

Recebido em 02 de maio de 2012; aceito em 07 de agosto de 2012

#### Resumo

Nesse trabalho são apresentados os procedimentos metodológicos envolvidos no imageamento digital de paleocavernas colapsadas com *ground penetrating radar* (GPR), que ocorrem em tufas carbonáticas, situadas na borda oeste da Bacia Potiguar. Foi mapeada uma área em Quixeré (CE) e selecionado um afloramento na rodovia CE-377, denominado de Afloramento Quixeré. Em uma porção desta área foi confeccionado um fotomosaico e levantada uma seção-teste, com o GPR, para a comparação e parametrização das geometrias cársticas (aflorantes e as imageadas na linha geofísica). Os resultados foram satisfatórios e permitiram a adoção de critérios para a interpretação das paleocavernas colapsadas nas outras seções GPR, levantadas na região do afloramento. Foram adquiridas duas malhas de linhas GPR, a primeira mais ampla e espaçada norteou a locação da segunda, mais adensada, na porção sul do Afloramento Quixeré. Nos radargramas foram interpretadas e parametrizadas as geometrias das principais paleocavernas colapsadas. Para cada malha foi elaborado um modelo de sólido digital do Afloramento Quixeré, sendo que o primeiro modelo permitiu o reconhecimento da distribuição geral das tufas e a localização das paleocavernas colapsadas, enquanto o segundo modelo digital, por ser mais detalhado, possibilitou não apenas a individualização 3D das principais paleocavernas mas também o cálculo dos seus respectivos volumes. Os modelos de sólidos digitais são aqui apresentados como uma nova fronteira no estudo de afloramentos análogos a reservatórios (hídricos ou petrolíferos), na qual a parametrização e a caracterização volumétrica dos corpos geológicos passam a ser fundamental para compor bancos de dados, que conjuntamente com informações de propriedades petrofísicas serão utilizados em simulações computacionais mais realísticas de reservatórios.

**Palavras-chave:** Paleocaverna colapsada; *Ground penetrating radar*; Afloramento análogo; Modelo de sólido digital.

#### Abstract

In this paper we present the methodological procedures for digital imaging of collapsed paleocaves in carbonate tufas using ground penetrating radar (GPR). These carbonate deposits occur in the Quixeré region, Ceará State (NE Brazil), on the western border of the Potiguar Basin. Collapsed paleocaves are exposed along a state road, which were selected to this study. We chose a portion of the called Quixeré outcrop for making a photomosaic and carrying out a GPR test section to compare and parameterize the karst geometries on the geophysics line. The results were satisfactory and led to the adoption of criteria for the interpretation of others GPR sections acquired in the region of the Quixeré outcrop. Two grids of GPR lines were acquired; the first one was wider and more spaced and guided the location of the second grid, denser and located in the southern part of the outcrop. The radargrams of the second grid reveal satisfactorily the collapsed paleocaves geometries. For each grid has been developed a digital solid model of the Quixeré outcrop. The first model allows the recognition of the general distribution and location of collapsed paleocaves in tufa deposits, while the second more detailed digital model provides not only the 3D individualization of the major paleocaves, but also the estimation of their respective volumes. The digital solid models are presented here as a new frontier in the study of analog outcrops to reservoirs (for groundwater and hydrocarbon), in which the volumetric parameterization and characterization of geological bodies become essential for composing the databases, which together with petrophysical properties information, are used in more realistic computer simulations for sedimentary reservoirs.

**Keywords:** Collapsed paleocave; Ground penetrating radar; Analog outcrop; Digital solid model.

## INTRODUÇÃO

A evolução dos procedimentos de aquisição/processamento de dados geofísicos obtidos por diversos métodos — *ground penetrating radar* (GPR), sísmica rasa, tomografia elétrica — de imageamento raso (<30 m) e a necessidade de parametrização de feições geológicas (deposicionais e deformacionais), em afloramentos análogos a reservatórios petrolíferos, têm motivado muitos grupos de pesquisa a direcionar suas forças para o imageamento de alvos geológicos específicos. O grupo de pesquisadores do Laboratório de Análises Estratigráficas (LAE) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) tem concentrado esforços no desenvolvimento de metodologias para imagear geometrias com GPR e na elaboração de modelos de sólidos digitais de paleocavernas colapsadas. Neste trabalho são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para o imageamento, parametrização e modelagem, além dos primeiros resultados obtidos na caracterização geométrica de tufas carbonáticas da Bacia Potiguar, onde ocorrem paleocavernas colapsadas, inclusive com a elaboração de modelos de sólidos digitais do afloramento estudado.

O radar de penetração no solo, do inglês *ground penetrating radar* (GPR), é uma metodologia de investigação não invasiva que pode ser utilizada para a detecção e locação de objetos soterrados em até poucos metros de profundidade e/ou para o mapeamento e imageamento de feições geológicas em subsuperfície. Este método geofísico é considerado ainda de grande potencial para a caracterização e mapeamento de heterogeneidades deposicionais ou deformacionais, em diferentes contextos geológicos (Jorry, Bièvre, 2010), como demonstrado nos artigos de Pratt e Miall (1993), Jol et al. (2003), Reyes-Pérez et al. (2003a), Asprien et al. (2009), entre muitos outros a despeito das quase duas décadas de sua aplicação.

As publicações que descrevem o imageamento de cavernas colapsadas remontam da década de 90 (Loucks, Mescher, 1996; Casas et al., 1996; McMechan et al., 1998). Entretanto, desde a década de 1980 se conhece a importância dos reservatórios petrolíferos que se desenvolvem em paleocavernas colapsadas (Loucks, Anderson, 1985; Kerans, 1988; Candelária, e Reed, 1992; Stoudt, 1996). Enquanto as feições (deformacionais e deposicionais) de sistemas cársticos, com paleocavernas colapsadas, já são conhecidas desde a década de 1970 (Lucia, 1971; Kerans, 1988; Wilson et al., 1992; Combs et al., 2003). Alguns trabalhos são referências quando se tratam de imageamento 3D com GPR como as contribuições de Guidry et al. (2007), que mostram o imageamento de dolinas, e de Loucks et al. (2004), que apresentam o imageamento de cavernas colapsadas coalescentes. No Brasil, Reyes-Pérez et al. (2003b) e Reyes-Pérez et al. (2004) foram pioneiros

no uso do GPR para imagear paleocavernas colapsadas em tufa, que ocorrem na borda oeste da Bacia Potiguar.

O estudo de afloramentos análogos a reservatório do tipo paleocaverna colapsada (*analogs of collapsed paleocave hydrocarbon reservoir*) oferece a melhor aproximação para o entendimento de sua evolução e permite o imageamento de suas geometrias em 3D. Isto é possível graças à utilização de métodos geofísicos não invasivos como o GPR, que tem como característica principal a capacidade de imagear a subsuperfície rasa, com resolução submétrica e em virtude de seu processamento ser mais simples em relação à sísmica, não requerendo uma complexa infraestrutura computacional. As informações obtidas com o levantamento GPR, segundo malhas pré-definidas, permitem a elaboração de modelos de sólidos digitais (*digital solid model*), que podem expressar uma boa aproximação das geometrias das paleocavernas colapsadas.

Neste trabalho são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para o imageamento da geometria (2D) de paleocavernas colapsadas, com o uso do GPR; para o processamento digital dos dados geofísicos; e, para a elaboração de modelos de sólido digital.

## CONTEXTO GEOLÓGICO

De acordo com Matos (1992), a Bacia Potiguar é uma típica bacia rifte em uma margem continental passiva. A fase rifte começou em resposta ao rompimento do Pangea durante a abertura do Atlântico Sul, no Neocomiano Inferior. Seu preenchimento sedimentar (Formação Pendência) foi depositado em ambiente continental típico (Araripe, Feijó, 1994). Durante o Aptiano, os esforços extensionais saltaram para o leste, deixando um sistema de riftes continentais abortados no extremo Nordeste do Brasil. Uma subsequente subsidência térmica ocorreu, permitindo a deposição de uma unidade de transição (Formação Alagamar), que foi recoberta com sequências drifte de siliciclásticas (Formação Açu) e carbonáticas (Formação Jandaíra) (Tibana, Terra, 1981; Viviers, Regali, 1987; Bertani et al., 1990). O limite entre tais sequências está bem gravado na topografia local na forma de uma expressiva escarpa.

Na borda oeste da Bacia Potiguar afloram rochas siliciclásticas, principalmente arenitos médios a muito finos, argilitos, folhelhos, siltitos e, subordinadamente, calcilitos e margas dolomitizadas da Formação Açu, unidade litoestratigráfica definida por Kreidler e Andery (1949) e formalizada por Sampaio e Schaller (1968). Na região de Quixeré, essas rochas foram depositadas em um contexto transgressivo, em ambiente transicional, e correspondem à unidade Açu IV, informalmente proposta por Vasconcelos et al. (1990), que corresponde à porção superior da

Formação Açú. Para a deposição da unidade Açú IV, foi interpretado um sistema litorâneo-estuarino do tipo Ilha Barreiras, cortado por canais de maré, que represavam lagunas na retaguarda (Vasconcelos et al., 1990; Córdoba, 2001). O Membro Mossoró, também equivalente ao Açú IV, foi estudado por Castro (1993) que interpretou quatro sistemas deposicionais: fluvial meandrante, planície deltaica, planície de maré e marinho raso. Bagnoli (1993), ao estudar os arenitos do mesmo membro no Campo de Canto do Amaro, identificou canais de maré, lagunas e pântanos.

As rochas carbonáticas mapeadas na região são consideradas como pertencentes à Formação Jandaíra, definida por Sampaio e Schaller (1968). Esta formação é composta por *mudstones* a *grainstones*, com eventuais intercalações de arenitos siliciclásticos, folhelhos, margas e evaporitos. Essas rochas são típicas de águas límpidas e clima tropical (Soares, Rosset, Cassab, 2003). De acordo com Pessoa Neto et al. (2007), essas rochas foram depositadas do Turoniano ao Campaniano, em um evento transgressivo de afogamento dos sistemas fluviais e estuarinos (Formação Açú), na porção emersa da Bacia, de tal forma que se estabeleceu uma plataforma/rampa carbonática.

Uma característica marcante das rochas que compõem a Formação Jandaíra é a presença de uma rica e diversificada associação fóssilífera, onde predominam gastrópodes, foraminíferos, bivalvíos, equinóides, conchostráceos, amonóides e icnofósseis. Os fósseis encontrados também refletem a deposição em regiões correspondentes aos sistemas de planície de maré e lagunar. Em geral, os depósitos são autóctones, com os indivíduos preservados em posição de vida (Soares, Rosset, Cassab, 2003). Córdoba (2001) reconhece 20 fácies deposicionais, inseridas em 3 grupos: fácies carbonáticas, fácies mistas e fácies siliciclásticas. Sendo as fácies carbonáticas, de maior representatividade, subdivididas em três: 1) fácies de águas rasas e semi-restritas; 2) fácies de águas intermediárias; 3) fácies de águas profundas.

Na porção central da área pesquisada ocorre uma estreita faixa de tufas, com direção NE-SW, paralela à escarpa da Bacia Potiguar, que limita, em superfície, as rochas das formações Açú e Jandaíra. A faixa apresenta uma largura variável (285 a 780 m) e comprimento de 17 km, distribuída segundo uma área de aproximadamente 5,5 km<sup>2</sup>. As tufas encontradas possuem alta porosidade e permeabilidade, em relação às rochas carbonáticas da Formação Jandaíra e se apresentam com intenso fraturamento, gerado por esforços gravitacionais (Reyes-Pérez et al., 2003c). As paleocavernas colapsadas ocorrem preferencialmente nas tufas.

O afloramento escolhido para o imageamento da sub-superfície com o GPR localiza-se próximo à escarpa, em um corte da Rodovia CE-377 (Figura 1), denominado de Afloramento Quixeré. Neste afloramento são encontradas

tufas, originadas da dissolução e reprecipitação de rochas carbonáticas da Formação Jandaíra. Com enquadramento estratigráfico ainda não definido, apresentam paleocavernas colapsadas, moldes de folhas e fragmentos de estalactite e estalagmite (Figura 2).

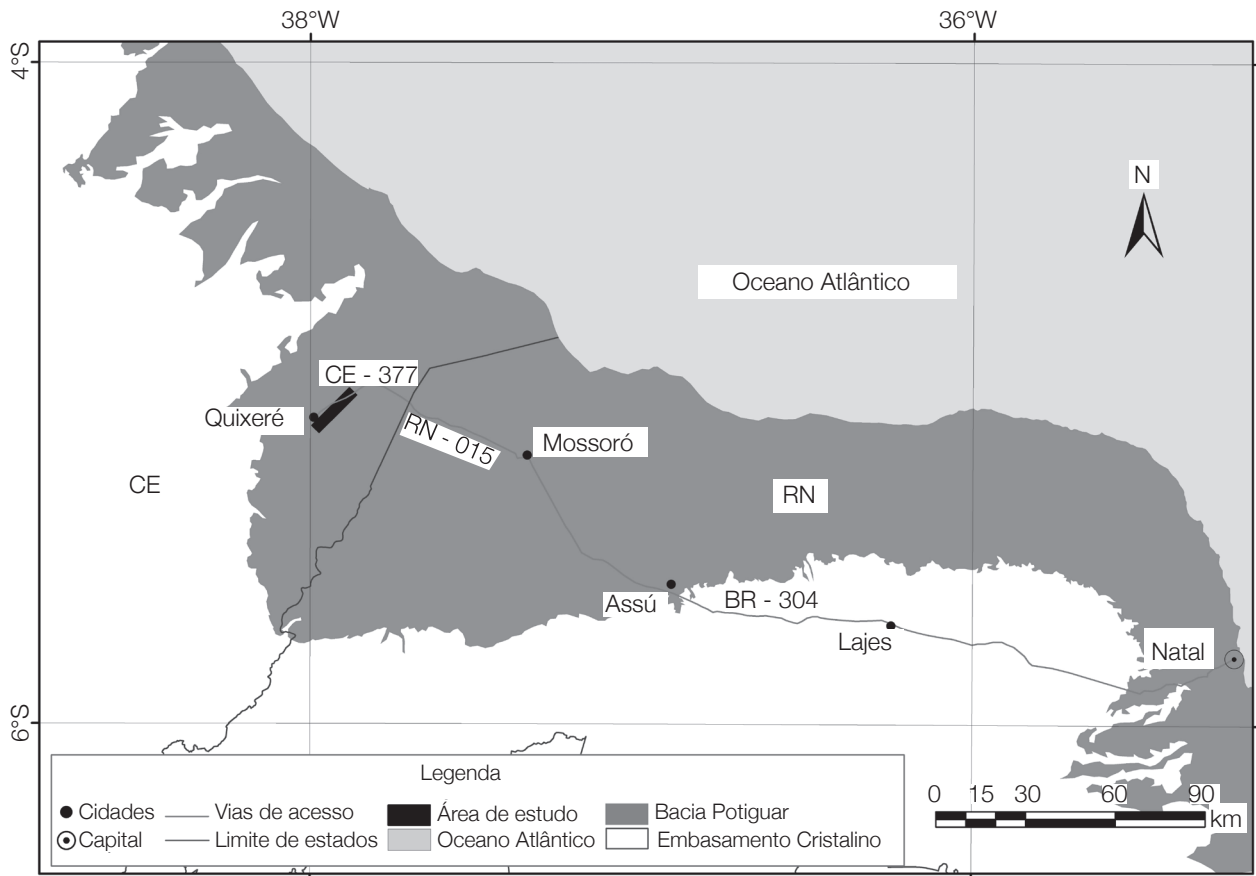
## FEIÇÕES CÁRSTICAS

O termo tufa é aqui utilizado como proposto por Ford e Pedley (1996), que consideram como sendo um produto resultante da precipitação de carbonatos em águas não termais, contendo restos de vegetais, invertebrados e bactérias. Sallun Filho et al. (2009), estudando depósitos de tufas quaternárias no Estado de Mato Grosso do Sul, também usam o termo tufa com esta conotação. As tufas do Brasil são conhecidas desde a década de 1960 em Mato Grosso (Almeida, 1964); a década de 1970 nos estados do Ceará, Paraíba e Pernambuco (Muniz, Ramirez, 1971); a década de 1990 na Bahia (Auler, 1999); e, no Rio Grande do Norte, Rio de Janeiro e Sergipe, desde o início deste século (Reyes-Pérez, 2003; Reyes-Pérez et al., 2003a; Ramos et al., 2005; Souza-Lima, Farias, 2007, respectivamente).

Os sistemas de paleocavernas colapsadas constituem-se em uma importante categoria de reservatórios carbonáticos, com a vantagem que podem apresentar excepcional porosidade/permeabilidade e por existirem abundantes afloramentos análogos situados próximos da superfície, portanto ao alcance do método GPR. Entretanto, tendem a apresentar uma complexa história de formação e um grau acentuado de heterogeneidade (lateral e vertical), especialmente quando envolvem múltiplas fases de carstificação e soterramento. Tornando, muitas vezes, complexa a interpretação da sua evolução e dificultando o imageamento digital 3D de suas heterogeneidades (deposicionais e deformacionais) laterais e verticais.

O material que rodeia e/ou preenche uma caverna colapsada pode ser fruto de: a) fragmentos de rochas que colapsaram do seu teto e da parede; b) material precipitado em cachoeiras ou represas; c) calcário pulverulento ou também, o que é mais comum; ou d) uma mistura destes tipos de carbonatos. Loucks (1999) propôs uma classificação que englobasse os tipos mais frequentes de preenchimento de caverna, a partir de um diagrama triangular (Figura 3).

As brechas e fraturas formadas durante o desabamento do teto possuem formas radiadas podendo se intersectar com outras brechas e fraturas provenientes de outra caverna colapsada. O resultado é que, além da interligação ou coalescência das passagens das cavernas com brechas caóticas, brechas de quebraimento, brecha em mosaico e fraturas, verifica-se a formação de contatos abruptos, encurvamento das camadas inferiores e aumento da compactação



**Figura 1.** Mapa de localização e acesso da área estudada, próxima à fronteira do Ceará com o Rio Grande do Norte, na borda oeste da Bacia Potiguar.

das rochas (Loucks, 1999). Os poros entre as brechas associados às brechas caóticas diminuem com o aumento da compactação mecânica.

A coalescência em um sistema de caverna, conectada a zonas de porosidade elevada, resulta em um reservatório heterogêneo de centenas a milhares de metros, formando um alvo de exploração muito maior do que teria sido se fosse resultado do colapso de uma única caverna (McMechan et al., 1998). A coalescência em um sistema de caverna também foi observada por Loucks (1999). Ele mostra que os sistemas de paleocavernas que formam grandes reservatórios de hidrocarbonetos não são produtos do colapso de cavernas formadas isoladamente a alguns metros de profundidade e de dezenas a centenas de metros de comprimento, mas sim, de vários sistemas de cavernas integrados, que formaram uma estrutura de milhares de metros de comprimento.

É fundamental que o interprete dos radargramas tenha consciência dos tipos de depósitos sedimentares encontrados nas cavernas colapsadas e de suas complexas relações geométricas, responsáveis pelas heterogeneidades deposicionais

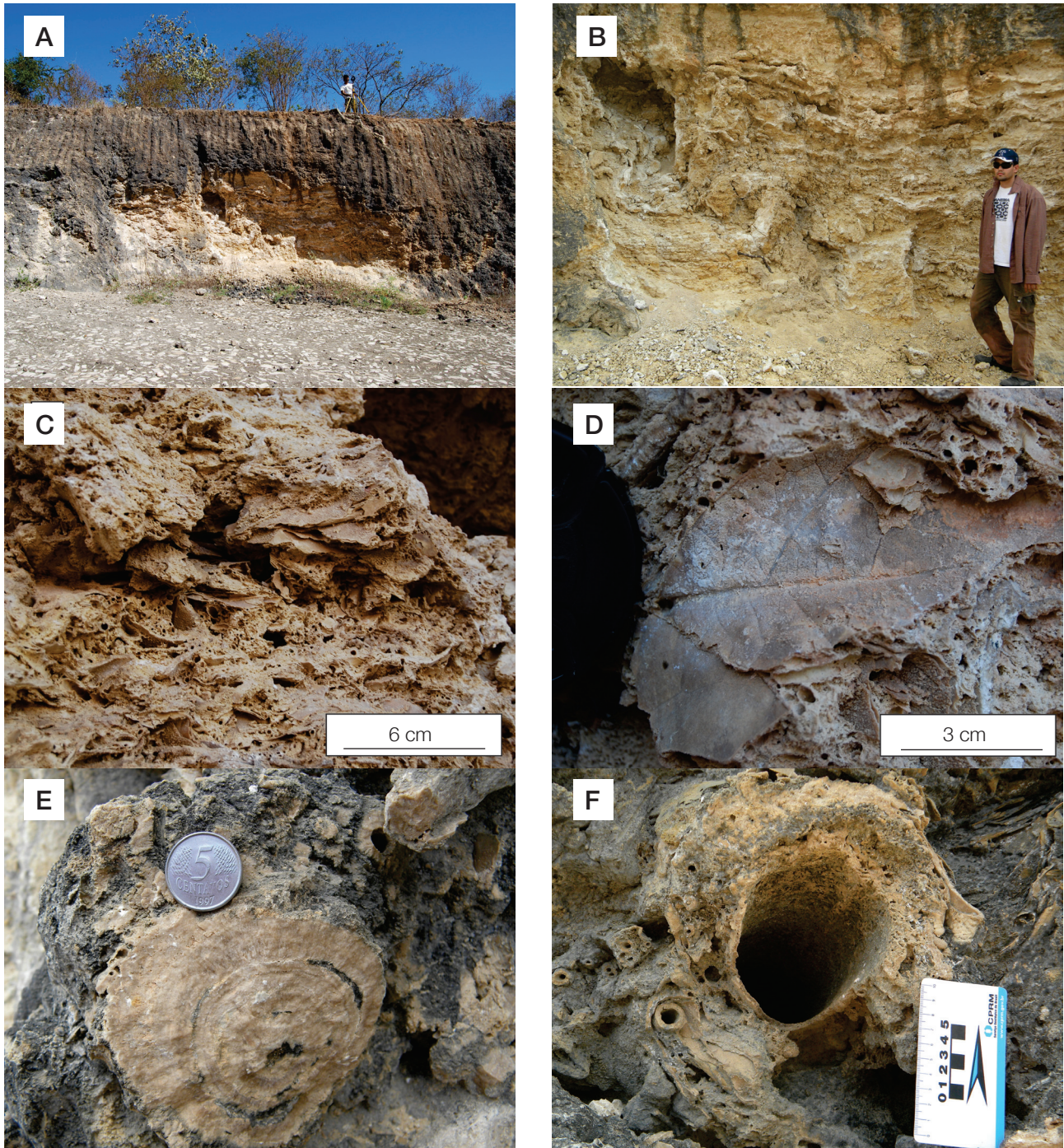
ou deformacionais desenvolvidas, para que seja realizada uma interpretação mais realística dos dados GPR.

## MÉTODOS

### Mapeamento e seleção de afloramento para aquisição de linhas *ground penetrating radar*

Um mapeamento geológico foi realizado, na escala de 1:50.000 (Figura 4), com o propósito de delimitar áreas de ocorrência das tufas no entorno do Afloramento Quixeré, além de identificar outros possíveis afloramentos do tipo paleocavernas colapsadas na região. A área mapeada possui cerca de 70 km<sup>2</sup> e está situada na borda oeste da Bacia Potiguar. Foram mapeadas rochas siliciclásticas da Formação Açú e carbonáticas da Formação Jandaíra, além de tufas, cujo posicionamento cronoestratigráfico ainda não foi conclusivamente definido.

Dentre os afloramentos mapeados, o que proporcionou as melhores condições para a realização das pesquisas

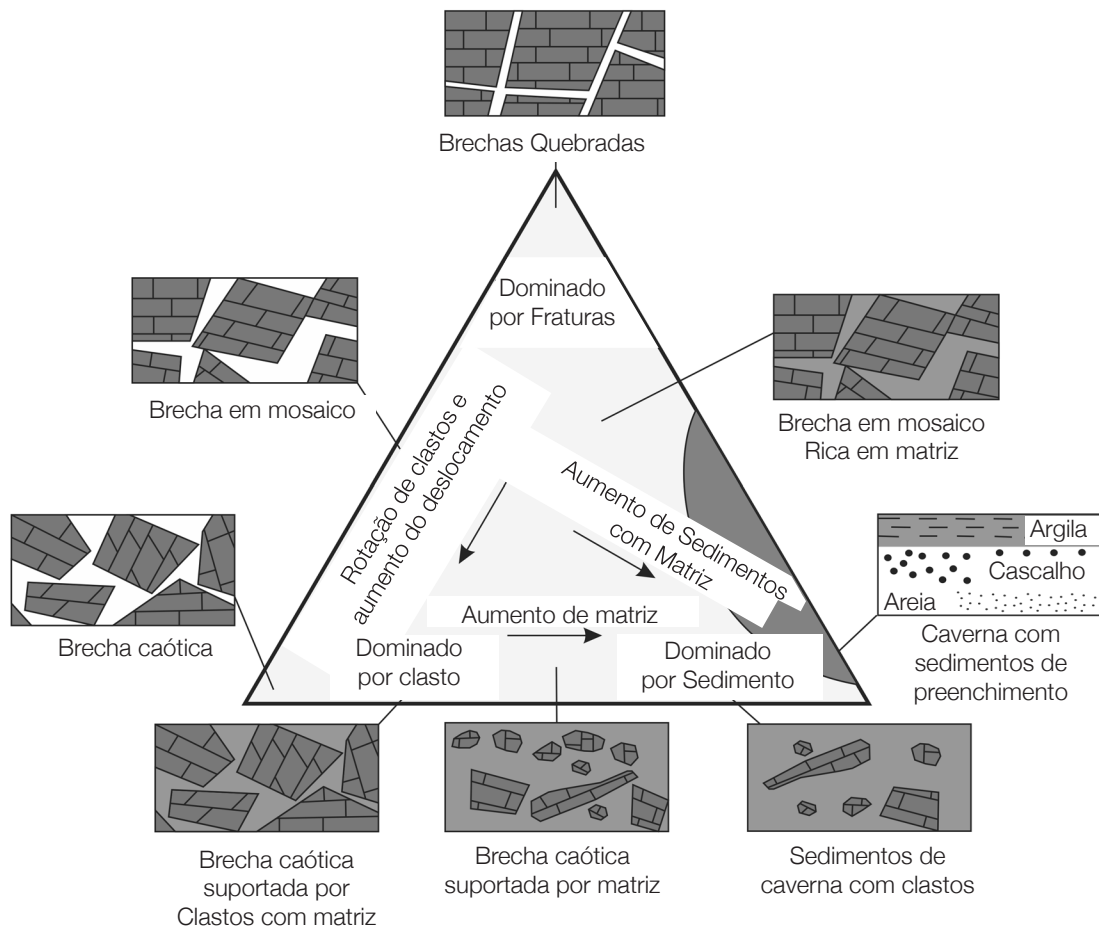


**Figura 2.** Feições encontradas nas paleocavernas colapsadas de Quixeré (A e B), moldes de folhas (C e D) e fragmentos de estalactite e estalagmite (E e F).

geofísicas com o uso do GPR foi o próprio Afloramento Quixeré, localizado na porção sudoeste da área (Figura 4). Ele foi selecionado por apresentar um extenso corte de estrada (Figura 5), o que facilita correlações diretas entre os dados GPR e a estratigrafia mais superficial das unidades geológicas aflorantes.

#### **Aquisição dos dados de *ground penetrating radar***

Foi realizado um levantamento teste com o GPR, segundo uma linha paralela ao corte de estrada, na porção superior da escarpa (Figura 5), com uma distância máxima de 2 m da borda e com comprimento de cerca de 85 m.



**Figura 3.** Classificação de brechas e sedimentos de preenchimento de cavernas. A área sombreada na porção inferior direita indica que nenhuma característica de caverna é encontrada. Modificado de Loucks (1999).

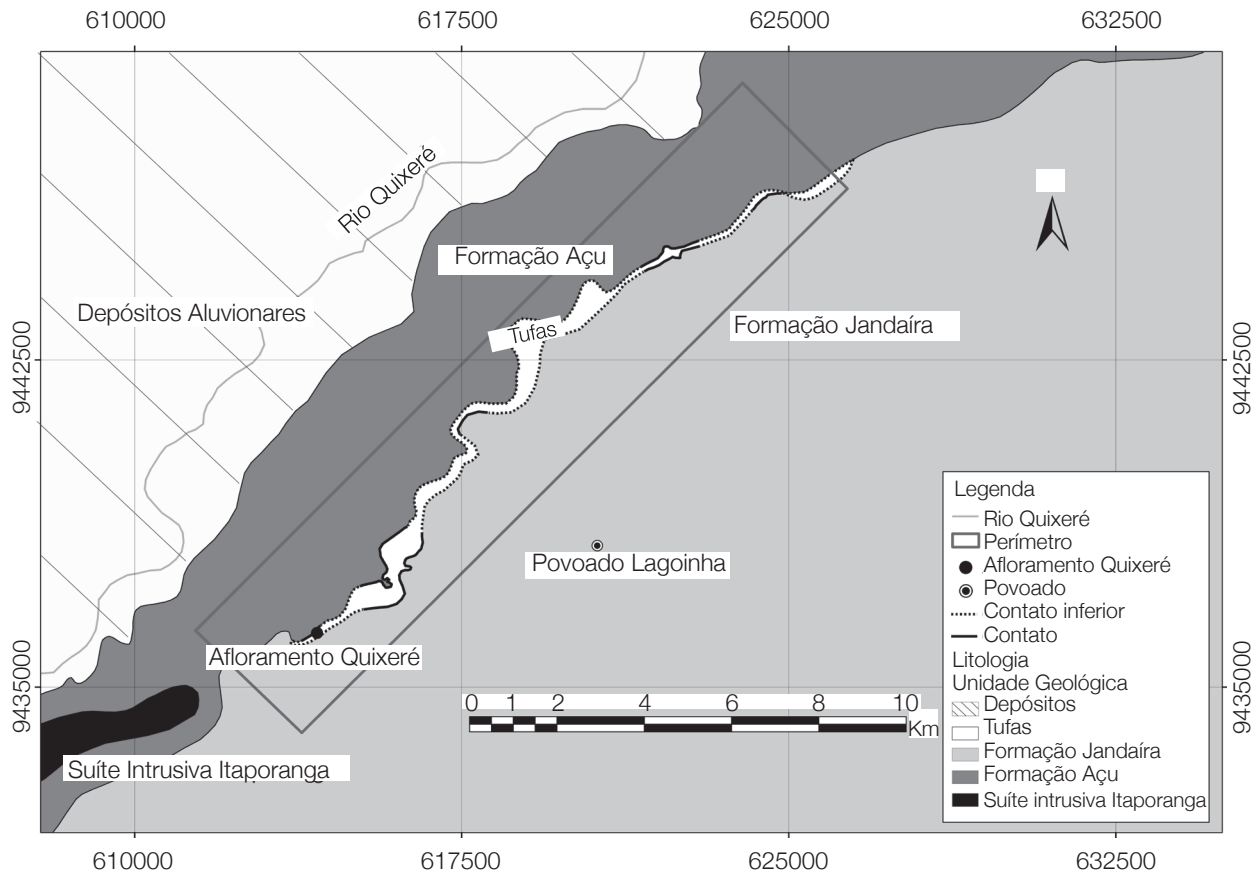
Com esta seção-teste, foi possível fazer correções entre os tempos de chegada dos refletores, observados nas seções GPR, e as profundidades dos contatos de topo e base das camadas sedimentares e feições cársticas. Com base nestas correções, foram estimados valores mais precisos para as velocidades de propagação das ondas eletromagnéticas neste meio e parametrizadas as profundidades dos refletores nas demais seções GPR, nas quais a correlação direta não é possível. Os dados calculados nestes ensaios se aproximaram dos valores de velocidades obtidos em uma *common mid point* (CMP) realizada na porção central da seção teste.

Um fotomosaico do corte de estrada foi montado a partir de fotografias obtidas com uma câmera fotográfica digital, com a resolução de oito megapixels (Figura 5). Foram mantidos durante a aquisição o afastamento regular entre a câmera e o afloramento; o ângulo de 90° entre a câmera e o plano geral do corte da parede; e, o recobrimento mínimo de 45% entre cada fotografia. O fotomosaico foi gerado com o um *software* de processamento de

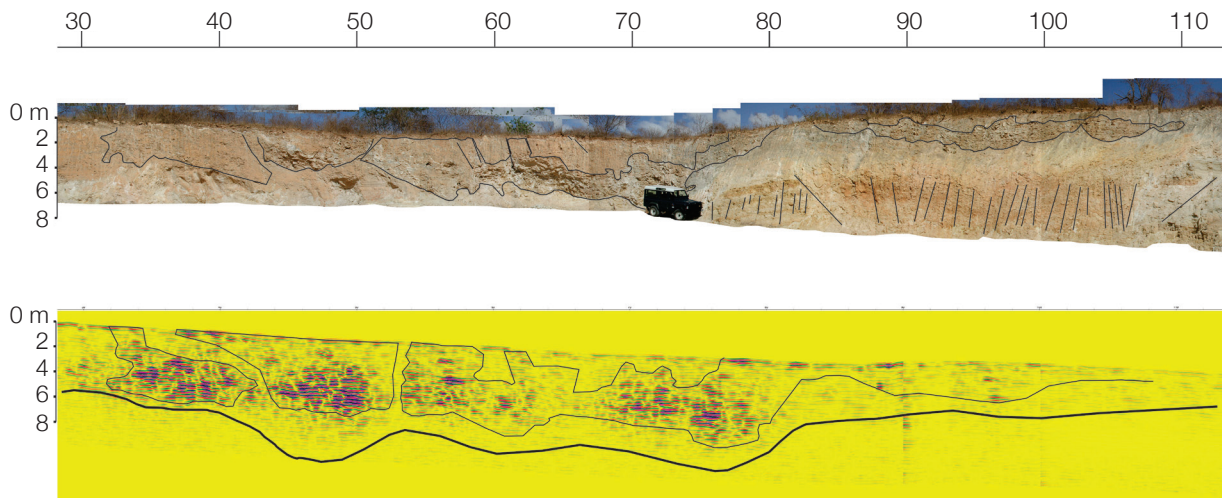
imagens, utilizando-se o maior número de pontos de controle possível.

Os dados GPR foram adquiridos com um equipamento SIR-3000, fabricado pela empresa *Geophysical Survey Systems, Inc.* (GSSI), com antena de 200 MHz. Diferentes configurações de aquisições foram testadas. Os parâmetros de aquisição que ofereceram os melhores resultados foram obtidos com: a janela temporal de 150 ns; 512 amostras por traço; e, espaçamento de 2 cm entre cada traço.

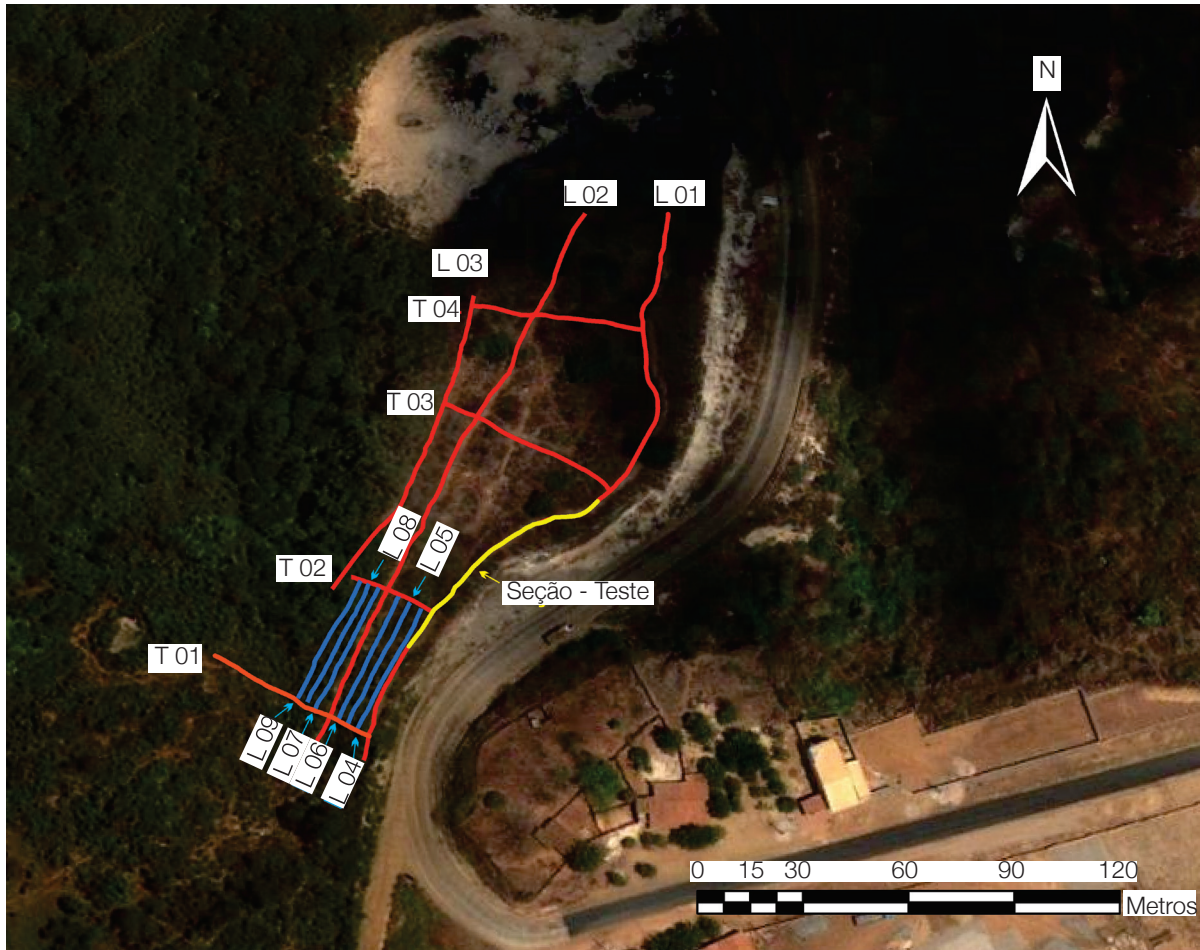
As aquisições geofísicas foram realizadas segundo duas malhas irregulares, com diferentes densidades (Figura 6). A primeira foi levantada com sete linhas GPR (longitudinais e transversais) mais extensas e espaçadas. As 3 linhas paralelas (longitudinais) à escarpa do afloramento apresentam comprimento de 195, 173 e 94 m. São separadas entre si por uma distância que variou de 7,5 a 45 m. Por sua vez, as 4 linhas perpendiculares (transversais) variam de 25 a 50 m de comprimento e são separadas entre 35 a 55 m. A segunda malha, mais densa, foi



**Figura 4.** Mapa geológico da região de Quixeré (CE). No retângulo está destacada a região de ocorrência das tufas, na escarpa da Chapada do Apodi. Projeção UTM, datum SIRGAS 2000, zona 24 S.



**Figura 5.** Fotomosaico e seção-teste GPR do corte de estrada do Afloramento Quixeré, onde foram inferidas as geometrias das paleocavernas colapsadas e o limite inferior das tufas. Percebe-se a boa coincidência entre as paleocavernas delineadas no fotomosaico e interpretadas no radargrama.



**Figura 6.** Distribuição das malhas onde foram levantadas as seções GPR no Afloramento Quixeré. Em vermelho a malha 1, em azul a malha 2 e em amarelo a seção-teste.

projetada para ser um detalhamento da porção sul do primeiro arranjo (Figura 6). Esta malha foi posicionada entre as linhas longitudinais L01 e L02 e as linhas transversais T01 e T02, e é formada por 6 linhas longitudinais, com comprimento de 38 m e afastamento de 3 m entre si.

Para o georreferenciamento das linhas GPR, procedimento necessário para a geração do modelo de sólido digital, foram adquiridas as coordenadas geográficas com um GPS geodésico. Para tanto foi utilizado um par de receptores (base e intinerante/*rover*) GPS da marca Topcon Hiper Lite<sup>+</sup>, com RTK. Os dados após processados forneceram precisão milimétrica e acurácia centimétrica. Com as informações espaciais disponíveis as seções GPR foram inseridas em um ambiente virtual 3D no *software Opentect*.

### Processamentos dos dados *ground penetrating radar*

O processamento dos dados GPR teve como objetivos principais a retirada de ruídos, a correção topográfica e o

realce dos refletores característicos das paleocavernas colapsadas. O processamento foi realizado segundo as seguintes etapas: 1) correção do tempo zero — *offset* — que ajusta o tempo inicial de registro da primeira onda a chegar à antena receptora, denominada de onda aérea; 2) filtro *Dewow* para remoção dos ruídos de baixa frequência, gerados pela indução eletromagnética que ocorre entre as antenas transmissora e receptora; 3) filtro *background removal* cuja função é remover refletores contínuos, que também podem ser gerados pela indução eletromagnética entre as antenas transmissora e receptora; 4) ganho para realçar os refletores mais profundos [*start time* (0); *linear gain* (3); *exponent* (6); *max gain* (1,2)]; 5) correção topográfica utilizada para contemplar as variações topográficas do terreno. Foi também aplicada a conversão tempo-profundidade, através do cálculo do valor da constante dielétrica média do afloramento. Para tanto, na seção-teste (Figura 5), foi medida a altura (m) da base de uma paleocaverna colapsada até o topo do afloramento. Como o equipamento GPR mede o tempo duplo de reflexão em nanossegundos (ns),



foi observado o tempo correspondente à reflexão na base da referida paleocaverna colapsada e, então, calculada a velocidade média de propagação das ondas eletromagnéticas no meio resultou o valor de 0,106 m/ns ( $v$ ). Com o valor de  $v$  obtido e usando a fórmula:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$$

onde  $c$  é igual a  $3 \times 10^8$  m/s (velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo), foi calculada a constante dielétrica ( $\epsilon$ ) para esta porção do afloramento, resultando o valor igual a 8. Este valor é compatível ao encontrado na literatura para rochas carbonáticas (Annan, 2001). A Figura 7 mostra um radargrama antes e depois de aplicadas as etapas do processamento dos dados GPR.

## RESULTADOS

Os radargramas obtidos permitem a identificação das regiões onde ocorrem as paleocavernas colapsadas, marcados por refletores fortes e descontínuos (Figura 5), principalmente quando suas amplitudes são realçadas com o uso do atributo de “Energia” (Figura 7). Este atributo é definido como a medida da refletividade do sinal ou razão entre o quadrado da soma das amplitudes (energia) e o número de amostras em uma janela temporal específica, com o comprimento próximo ao período da frequência dominante do sinal. Com este procedimento podem ser ressaltados refletores com amplitudes baixas e/ou irregulares, além de individualizar sequências com diferentes contrastes de impedância EM, com é o caso das paleocavernas colapsadas da

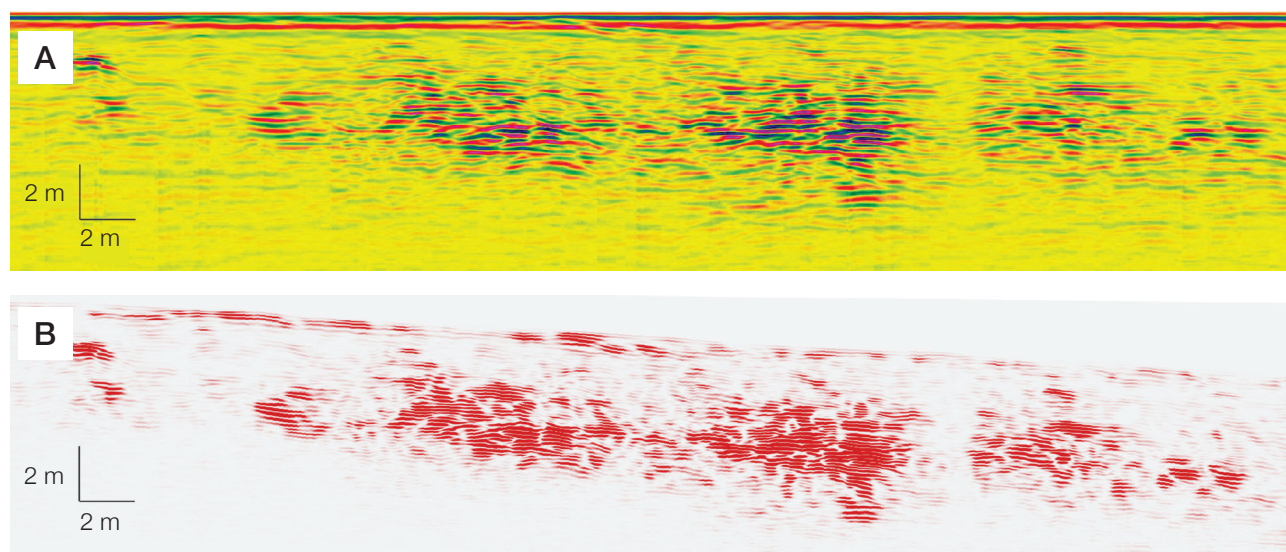
região de Quixeré. A variação no valor da constante dielétrica da região onde ocorrem as cavernas colapsadas e das rochas encaixantes é devido ao aumento da porosidade e a proporcional presença de ar ocupando os espaços vazios nestas estruturas cársticas, como sugerido por McBride et al. (2012).

Para demonstrar o resultado obtido no processamento e interpretação das seções GPR, onde foi possível delinear, com relativa precisão, as geometrias das paleocavernas colapsadas e sua continuidade lateral, foram selecionadas três seções, L07, L08 e L09, (Figura 6). Nestes radargramas foi possível ainda parametrizar as geometrias correspondentes aos cortes 2D das paleocavernas colapsadas imageadas, materializadas pelas espessuras e larguras, além de determinar as profundidades máximas onde elas ocorrem.

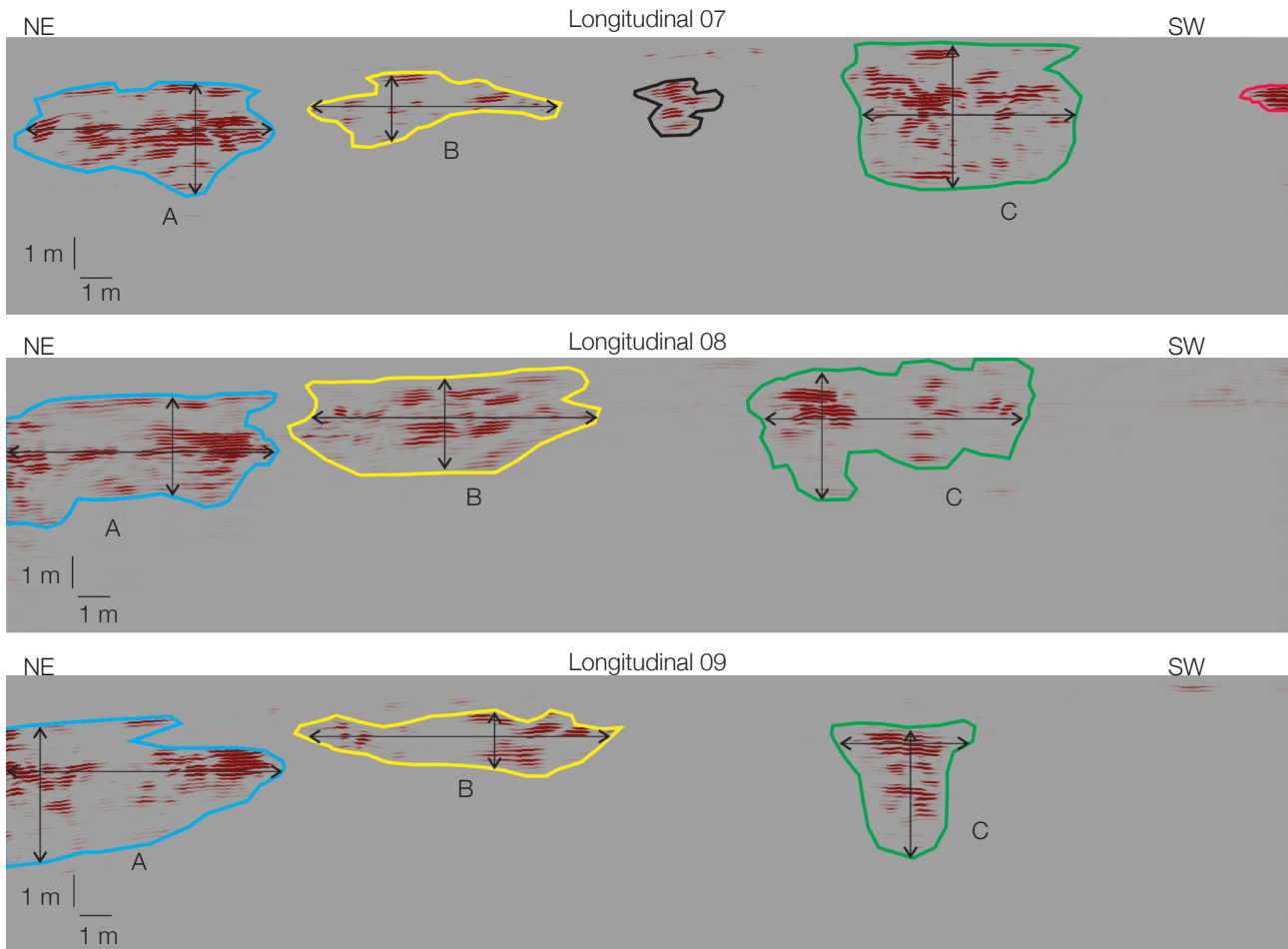
As três principais paleocavernas colapsadas interpretadas, denominadas de A, B e C, (Figuras 8 e 10), ocorrem com espessura variando de 1,6 a 4,4 m; largura variando de 2,7 a 9,4 m e comprimento variando de 6 a 18 m. De um modo geral, pode-se afirmar que as feições cársticas nas seções L07, L08 e L09 apresentam geometria irregular e ocorrem até a profundidade de 5,2 m, condicionadas a espessura das tufas. A parametrização das geometrias das paleocavernas colapsadas está apresentada na Tabela 1.

Com base nos radargramas georreferenciados foram elaborados dois modelos de sólidos digitais para o Afloramento Quixeré. No primeiro foram utilizadas todas as linhas GPR adquiridas e no segundo, um detalhamento da porção sul do afloramento, foram adensadas as seções GPR.

No primeiro modelo (Figura 9) é oferecida uma visão geral da distribuição da tufa e, especificamente, da



**Figura 7.** Comparação entre os radargramas com dados brutos (A) e processados (B) em um trecho da Linha L01. Ressalta-se a boa qualidade dos dados brutos.



**Figura 8.** Radargramas das linhas longitudinais L07, L08 e L09, processados com o atributo “Energia”. São apresentadas as interpretações e parametrizações das paleocavernas colapsadas (A, B e C), com indicação dos locais onde foram medidas as espessuras e larguras.

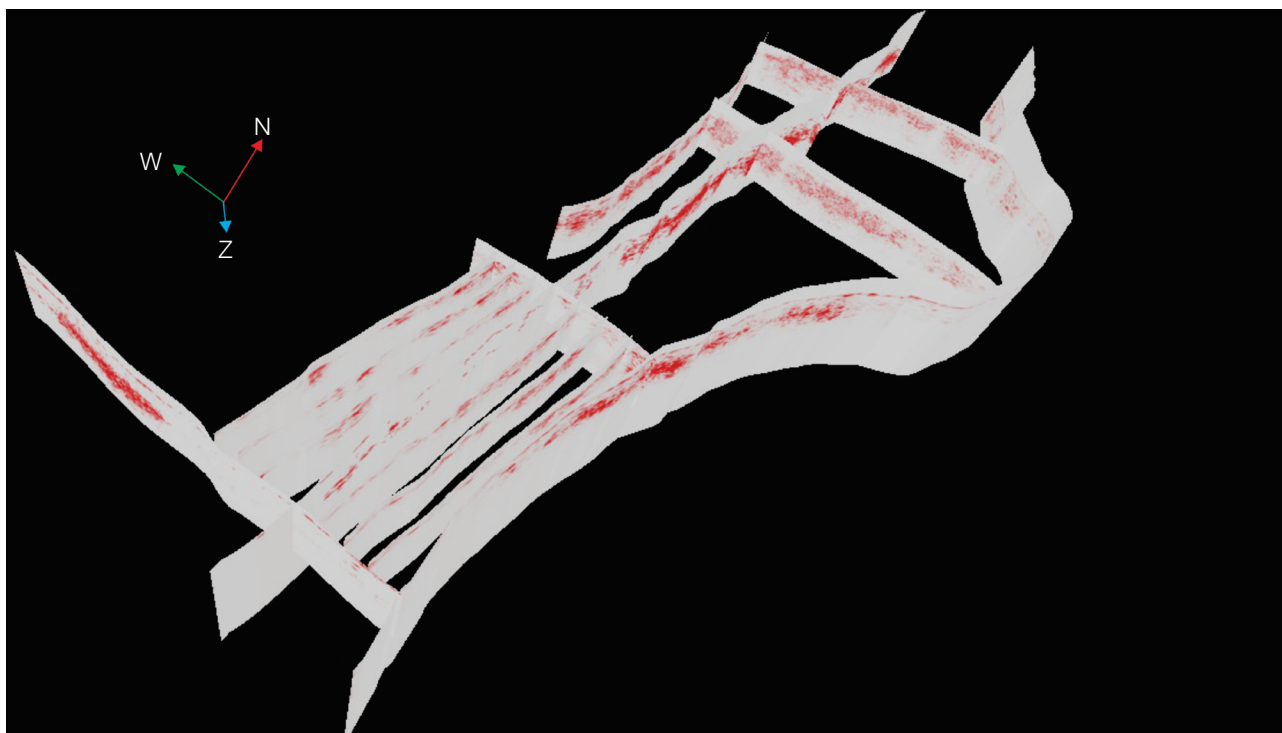
distribuição espacial das cavernas colapsadas, marcadas pelos tons avermelhados ao longo de todo afloramento. Para a elaboração do modelo de sólido digital da parte sul do Afloramento Quixeré, onde são encontradas as menores espessuras da tufa carbonática, foram utilizadas as seções GPR L04, L05, L06, L07, L08 e L09. Com este modelo foi possível identificar a distribuição espacial das paleocavernas colapsadas da porção sul do afloramento (Figura 9) evidenciando que estas feições estão concentradas nas porções centro e norte do afloramento, principalmente nas linhas longitudinais L02 e L03 e nas transversais T03 e T04.

Com o segundo modelo de sólido digital, da porção sul do Afloramento Quixeré, foi possível interpolar as geometrias das paleocavernas colapsadas, denominadas de A, B e C. Delimitadas as geometrias 2D e identificadas as suas figuras correspondentes nos radargramas, foram então gerados sólidos que representassem as paleocavernas colapsadas A, B, e C e estimados os seus respectivos volumes aproximados, ao longo do trecho compreendido pelo levantamento. Para a paleocaverna

colapsada A foi calculado o volume aproximado de 381 m<sup>3</sup>; a paleocaverna B, o volume foi de 431 m<sup>3</sup>, enquanto o volume da paleocaverna C foi estimado em 123 m<sup>3</sup> (Figura 10).

## CONCLUSÕES

Os procedimentos metodológicos aqui utilizados para o imageamento da geometria (2D) de paleocavernas colapsadas, em um corte da estrada CE-377, na borda oeste da Bacia Potiguar (Afloramento Quixeré) e os resultados obtidos mostram que é possível imagear, com o GPR, estas feições cársticas e gerar modelos de sólidos digitais que exibam boa aproximação de suas geometrias tridimensionais. A alta resolução obtida com o GPR, com a antena de 200 MHz, permite diferenciar as tufas carbonáticas dos calcários da Formação Jandaíra e discriminar as paleocavernas colapsadas. A comparação entre as geometrias que delimitam as paleocavernas colapsadas, nos fotomosaicos e nos



**Figura 9.** Modelo digital do Afloramento Quixeré elaborado com base em todas as seções GPR levantadas neste trabalho. Os fortes refletos, avermelhados e descontínuos representam a assinatura padrão das paleocavernas colapsadas.

**Tabela 1.** Valores de espessura, largura e profundidade das paleocavernas colapsadas parametrizadas nas seções GPR L07, L08 e L09.

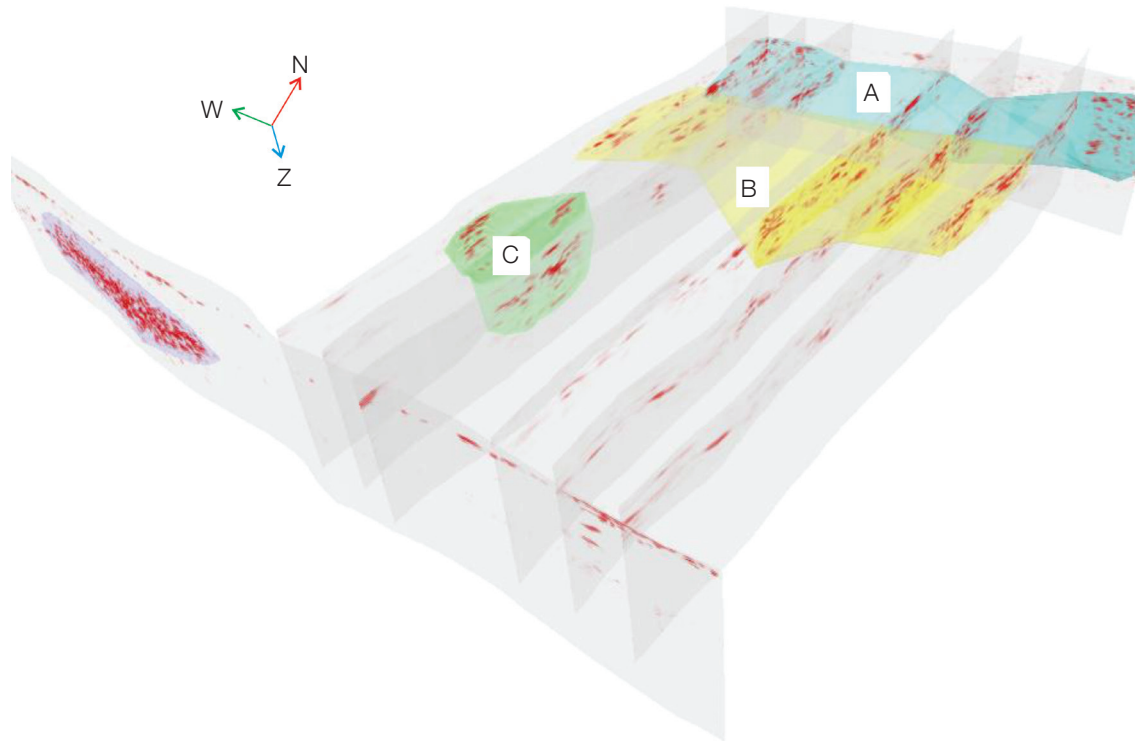
Paleocavernas Colapsadas	Espessura (m)	Largura (m)	Profundidade (m)
<b>Seção GPR L07</b>			
A	3,5	7,6	3,9
B	1,8	7,5	2,6
C	4,4	6,6	4,4
<b>Seção GPR L08</b>			
A	3,2	8,2	3,2
B	3	8,9	3
C	4	8,1	4
<b>Seção GPR L09</b>			
A	3,1	8,6	3,1
B	1,6	9,4	2,4
C	4	2,7	5,2

radargramas (2D), se mostrou bastante consistente, dando subsídio para que fossem levantadas seções GPR, paralelas e perpendicular ao corte da estrada CE-377, e, por analogia, interpretadas e delimitadas as citadas feições cársticas. O nível de detalhe aqui observado também permitiu a parametrização 2D das geometrias (largura, espessura e profundidades) das paleocavernas colapsadas nos radargramas.

Os radargramas interpretados serviram de base para a elaboração de dois modelos de sólidos digitais do Afloramento

Quixeré. Um modelo elaborado com todos os radargramas disponíveis, que oferece uma visão 3D do afloramento e a visualização das paleocavernas colapsadas. O segundo modelo, um detalhamento da porção sul do Afloramento Quixeré, elaborado a partir de uma malha adensada permitiu a identificação mais precisa das geometrias 3D destas feições cársticas, inclusive com o cálculo aproximado dos seus volumes.

Como os modelos de sólidos digitais permitem o cálculo do volume aproximado das paleocavernas colapsadas



**Figura 10.** Modelo de sólido digital da porção sul do Afloramento Quixeré, elaborado com base nas seções GPR L07, L08 e L09, onde podem ser visualizadas as três paleocavernas colapsadas (A, B e C).

(volume do reservatório) e, com base nas informações de campo, é possível quantificar o volume de vazios destes corpos (porosidade), pode-se então estimar a capacidade de armazenamento do reservatório. É importante também que seja determinada a existência de conectividade entre as paleocavernas e a presença de heterogeneidades, deposicionais ou deformacionais, que podem funcionar como dutos ou barreiras de fluxo.

Esta certamente é uma nova fronteira no estudo de afloramentos análogos a reservatórios (hídricos ou petrolíferos), onde a parametrização e a caracterização volumétrica dos corpos geológicos passam a ser fundamentais para alimentar os bancos de dados e distribuir as propriedades petrofísicas, com dados reais de reservatórios, para simulação de fluxo. Os resultados aqui obtidos mostram que o GPR pode fornecer a solução necessária para a elaboração dos modelos de sólidos digitais em afloramentos análogos a reservatórios do tipo cavernas colapsadas.

## AGRADECIMENTOS

A PETROBRAS através da Rede de Caracterização e Modelagem Geológica de Reservatórios (CARMOD), pelo financiamento desta pesquisa e a ANP PRH-22, pela bolsa de estudos do primeiro autor. Os autores agradecem à

empresa *dGB Earth Sciences* pela concessão de uma licença educacional do *software Opendtect v 4.2* e ao Prof. Dr. João Carlos Dourado, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) de Rio Claro, relator da Revista, pelas sugestões construtivas e correções do texto. DLC é bolsista de produtividade do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. Geologia do centro-oeste mato-grossense. *Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia*, DNPM, Rio de Janeiro, v. 215, p. 1-133, 1964.
- ANNAN, A. P. *Ground penetrating radar: workshop notes*. Sensors and Software Inc., Mississauga, Ontario, Canada, 2001. 192 p.
- ARARIPE, P. T.; FEIJÓ, F. Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, v. 8, n. 1, p. 127-141, 1994.
- ASPRION, U.; WESTPHAL, H.; NIEMAN, M.; POMAR, L. Extrapolation of depositional geometries of the Menorcan Miocene carbonate ramp with ground penetrating radar. *Springer: Facies*. Berlin/Heidelberg, v. 55, p. 37-46, 2009.

- AULER, A. S. *Karst evolution and palaeoclimate in eastern Brazil*. 1999. Tese (Doutorado) - University of Bristol, Bristol.
- BAGNOLI, E. The Mossoró sandstone, Canto do Amaro oil field, Late Cretaceous of the Potiguar Basin, Brazil: an example of a tidal inlet-channel reservoir. In: Rhodes, E.G.; Moslow, T.F. *Marine clastic reservoirs: examples and analogues*. New York: Springer-Verlag, 1993. p. 183-199.
- BERTANI, R. T.; COSTA, I. G.; MATOS, R. M. D. Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar. In: Gabaglia, G.P.R.; Milani, E.J. *Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1990. p. 291-310.
- CANDELARIA, M. P.; REED, C. L. Paleokarst, karst-related diagenesis, and reservoir development: examples from Ordovician-Devonian age strata of west Texas and the mid-continent. Permian Basin Section, *SEPM* 1992. 202 p.
- CASAS, A.; LÁZARO, R.; VILAS, M.; BUSQUET, E. Detecting karstic cavities with ground penetrating radar at different geological environments in Spain. Proceedings, INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 6., Tohoku University, 1996. p. 455-460.
- CASTRO, J. C. Facies, reservoirs and stratigraphic framework of the Mossoró Member (Latest Cenomanian- Earliest Turonian) in Potiguar Basin, NE Brazil: an example of a tide and wave dominated delta. In: Rhodes, E.G.; Moslow, T.F. *Marine clastic reservoirs: examples and analogues*. New York: Springer-Verlag, 1993. p. 161-182.
- COMBS, D. M.; LOUCKS, R. G.; RUPPEL, S. C. Lower Ordovician Ellenburger Group collapsed paleocave facies and associated pore network in the Barnhart field, Texas, In: HUNT, T. J.; LUFHOLM, P. H. *The Permian basin: Back to basics*. West Texas Geological Society Fall Symposium: West Texas Geological Society Publication. Texas, 2003. v. 3, p. 397-418.
- CÓRDOBA, V. C. *A evolução da plataforma carbonática Jandaíra durante o Neocretáceo na Bacia Potiguar: análise paleoambiental, diagenética e estratigráfica*. 2001. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Paulo.
- FORD, T. D.; PEDLEY, H. M. A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth-Science Reviews*, v. 41, p. 117-175, 1996.
- GUIDRY, S. A.; GRASMUECK, M.; CARPENTER, D. G.; GOMBOS JR., A. M.; BACHTEL, S.; VIGGIANO, D. A. Karst and early fracture networks in carbonates, turks and caicos islands, British West Indies. *Journal of Sedimentary Research*, Virginia, v. 77, p. 1-17, 2007.
- JOL, H. M.; BRISTOW, C. S.; SMITH, D. G.; JUNCK, M. B.; PUTNAM, P. Stratigraphic imaging of the Navajo sandstone using ground-penetrating radar. *The Leading Edge*, v. 22, n. 9, p. 882-887, 2003.
- JORRY, S. J; BIÉVRE, G. Integration of sedimentology and ground-penetrating radar for high-resolution imaging of a carbonate platform. *The journal of the International Association of Sedimentologists: Sedimentology*, v. 58, p. 1370-1390, 2010.
- KERANS, C. Karst-controlled reservoir heterogeneity in Ellenburger Group carbonates of west Texas. *AAPG Bull*, v. 72, p. 1160-1183, 1988.
- KREIDLER, W. L.; ANDERY, P. A. *Mapa Geológico da área sedimentar costeira do estado do Rio Grande do Norte e parte do Ceará*. Rio de Janeiro, Conselho Nacional do Petróleo: 1949. p. 86-90.
- LOUCKS, R. G; MESCHER, P. K. Architecture of collapsed-paleocave reservoir. In: 1996 AAPG CONVENTION AND EXHIBITION, San Diego. *Anais...* San Diego: AAPG, 1996, Abstract A87.
- LOUCKS, R. G.; ANDERSON, J. H. Depositional facies, diagenetic terranes, and porosity development in Lower Ordovician Ellenburger Dolomite, Puckett field, west Texas. In: ROEHL, P. O.; CHOQUETTE, P. W. *Carbonate petroleum reservoirs*. New York: Springer-verlag, 1985. p. 19-38.
- LOUCKS, R. G. Paleocave carbonate reservoirs: origins burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications. *AAPG Bull*. v. 83, n. 11, p. 1795-1834, 1999.
- LOUCKS, R. G.; MESCHER, P. K.; MCMECHAN, G. A. Three-dimensional architecture of a coalesced, collapsed-paleocave system in the Lower Ordovician Ellenburger Group, central Texas. *AAPG Bull*, v. 88, p. 545-564, 2004.
- LUCIA, F. J. Lower Paleozoic history of the western Diablo platform, west Texas and south-central New Mexico. In: Cys; J. M. Robledo Mountains and Franklin Mountains – 1971 Field Conference Guidebook: Permian Basin Section SEPM Publication. 1971. p. 174-214.

- MATOS, R. M. D. The northeast Brazilian rift system. *Tectonics*, v. 11, n. 4, p. 766-791, 1992.
- McBRIDE, J. H.; GUTHRIE, W. S.; FAUST, D. L.; NELSON, S. T. A structural study of thermal tufas using ground-penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, v. 81, p. 38-47, 2012.
- McMECHAN, G. A.; LOUCKS, R. G.; ZENG, X.; MESCHER, P. K. Ground penetrating radar imaging of a collapsed paleocave system in the Ellenburger dolomite, central Texas. *Journal of Applied Geophysics*, v. 39, p. 1-10, 1998.
- MUNIZ, G. C. B.; RAMIREZ, L. V. O. Tufo calcário (tufa) quaternário com moluscos, nos estados da Paraíba e Pernambuco. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 43, p. 611-618, 1971.
- PESSOA NETO, O. D.; SOARES, U. M.; SILVA, J. G.; ROESNER, E.H.; FLORENCIO, C.P.; VALENTIN DE SOUZA, C.A. Bacia Potiguar. *Boletim de Geociência da PETROBRAS*, v. 15, n. 2, p. 357-369, 2007.
- PRATT, B. R.; MIALL, A. D. Anatomy of bioclastic grainstone megashoal (Middle Silurian, southern Ontario) revealed by ground-penetrating radar. *The Geological Society of America: Geology*, v. 21, p. 223-226, 1993.
- RAMOS, R. R. C.; et al. Primeiro registro de tufas calcárias no Estado do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 10., 2005. Guarapari. *Anais... Guarapari: ABEQUA*, 2005. v. 1, p. 1-6.
- REYES-PÉREZ, Y. A. *Caracterização da geometria de depósitos sedimentares na Borda Sudoeste da Bacia Potiguar*. 2003a. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- REYES-PÉREZ, Y. A.; BEZERRA, F. H.; LIMA-FILHO, F.P. Falhas de gravidade em tufas calcárias na Bacia Potiguar, NE do Brasil. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 9., 2003a. Búzios. *Anais... Búzios: SNET*, 2003. v. 1, p. 276-279.
- REYES-PÉREZ, Y. A. et al. Aplicação do GPR no estudo de tufas calcárias na Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil. In: SIMPÓSIO DE GPR, 1., 2004. Fortaleza. *Anais... Fortaleza: SBG-NE*, 2004. v. 1, p. 1-3.
- REYES-PÉREZ, Y. A. et al. Tufas calcárias na Bacia Potiguar Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 9., 2003b. Recife. *Anais... Recife: ABEQUA*, 2003. v. 1, p. 1-4.
- REYES-PÉREZ, Y. A.; LIMA-FILHO, F. P.; MENEZES, L.; PORSANI, J. L.; APPI, C. J.; ARAUJO, V. D.; SOUZA, A. Caracterização da geometria de depósitos sedimentares da Formação Açú na borda sudoeste da Bacia Potiguar, NE do Brasil. *Revista de Geologia*, v. 16, n. 1, p. 19-34, 2003c.
- SAMPAIO, A. V.; SCHALLER, H. Introdução à estratigrafia cretácea da Bacia Potiguar. *Boletim Técnico da PETROBRAS*, v. 11, p. 19-44, 1968.
- SALLUN-FILHO, W.; KARMANN, I.; BOGGIANI, P. C.; PETRI, S.; CRISTALLI, P. S.; UTIDA, G. A deposição de tufas quaternárias no estado de Mato Grosso do Sul: proposta de definição da formação Serra da Bodoquena. *Geologia USP: Série Científica*, v. 9, p. 49, 2009.
- SOARES, U. M.; ROSSETT, E. L.; CASSAB, R. C. T. *Bacias sedimentares brasileiras, Bacia Potiguar*. Natal: Fundação Paleontológica Phoenix, v. 56, 2003. 8 p.
- SOUZA-LIMA, W.; FARIAS, R. M. A flora quaternária dos travertinos de Itabaiana, Sergipe. In: PALEO 2007, Itabaiana. *Anais... Itabaiana: SBP*, 2007. p. 7. Disponível em: <[http://www.phoenix.org.br/Paleo2007\\_Boletim.pdf](http://www.phoenix.org.br/Paleo2007_Boletim.pdf)>. Acesso em: 18 dez. 2008.
- STOUDT, E. L. Precambrian-Devonian geology of the Franklin Mountains, west Texas – analogs for exploration and production in Ordovician and Silurian karsted reservoirs in the Permian Basin: West Texas. Geological Society. 1996. Annual Field Trip Guidebook. 1996.
- TIBANA, P.; TERRA, G. J. S. Sequências carbonáticas do Cretáceo da Bacia Potiguar. *Boletim Técnico da PETROBRAS*. Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, p. 174-183, 1981.
- VASCONCELOS, E. P., et al. Unidades de correlação da Formação Açú. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990. Natal. *Anais... Natal: SBG*, 1990. v. 1, p. 227-240.
- VIVIERS, M. C., REGALI, M. S. P. Estudo paleoambiental preliminar do Cretáceo da Bacia Potiguar. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 17, n. 2, p. 123-130, 1987.
- WILSON, J. L.; MEDLOCK, R. L.; FRITZ R. D.; CANTER, K. L.; GEESAMAN, R.G. A review of Cambro-Ordovician breccias in North America. In: Candelaria, M.P.; Reed, C.L. Paleokarst, karst related diagenesis and reservoir development: Examples from Ordovician-Devonian age strata of west Texas and the mid-continent. *Permian Basin Section SEPM*, publication n. 92-33, p. 19-29, 1992.