



## Imageamento digital de paleocavernas colapsadas na Bacia Potiguar (RN/CE)

João Andrade dos Reis Júnior, David Lopes de Castro, Thales Eduardo Silva de Jesus, Francisco Pinheiro Lima Filho  
Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) - UFRN

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

The Ground Penetrating Radar (GPR) images the subsurface with submetre resolution. GPR profiles were conducted along an outcrop of Jandaíra Formation (Potiguar Basin) in order to test the viability of this imaging method applied to Limestone tufas in collapsed paleocave. The GPR 2D data was acquired along the entire outcrop, and allowed well correlations between reflector's pattern and tufas/speleothems in outcrop. The identification of (paleocavernas colapsadas) was made both by analysis of reflectors associated with tufas and by contact between the cave base and the roof collapsed.

### Introdução

Atualmente, devido ao contínuo crescimento da demanda por petróleo, bem como pelas dificuldades encontradas em realizar novas descobertas significativas de reservas e, ainda, pela existência de um grande número de campos maduros, há um crescente interesse em se compreender as heterogeneidades deposicionais e petrolíficas dos reservatórios em geral e, assim, aumentar tanto o fator de recuperação dos campos de petróleo já existentes, como otimizar os custos de produção de novas reservas.

As heterogeneidades deposicionais, de diferentes escalas, influenciam diretamente no comportamento do fluxo de fluidos em rochas reservatório. O reconhecimento da dimensão, geometria e orientação dos corpos sedimentares em macro e megascale, são considerados críticos no desenvolvimento e produção de óleo e gás em campos petrolíferos. Pesquisas voltadas para este tipo de reconhecimento têm possibilitado a otimização da produção, tanto por uma melhor quantificação do volume original, quanto pelo aumento do fator de recuperação (ME-NEZES, 2004).

Estudos sobre afloramentos análogos permitem compreender e prever o comportamento dos reservatórios em condições reais, pois a partir do conhecimento dos sistemas deposicionais, sua natureza, geometria e propriedades petrolíficas, é possível desenvolver modelos físicos e matemáticos aplicáveis a reservatórios em subsuperfície, minimizando custos e otimizando sua exploração (SANTOS et al., 2003).

As recentes descobertas de petróleo em cavernas carbonáticas têm aumentado significativamente o interesse por este tipo de reservatório. Exemplos de reservatórios em formações carbonáticas com cavernas colapsadas são encontrados no baixo Ordoviciano de Ellenburger e estratos Siluro-Devoniano do oeste do Texas (Loucks e Anderson, 1985; Kerans, 1988; Candelaria e Reed, 1992; Loucks e Handford, 1992; Holtz e Kerans, 1992; Stoudt, 1996).

Sistemas de paleocavernas formam importantes classes de reservatórios carbonáticos, as quais são originadas em processos cársticos próximos a superfície, sofrendo a ação de compactação mecânica e diagênese (Loucks e Anderson, 1985; Candelaria e Reed, 1992; Holtz e Kerans, 1992; Loucks e Handford, 1992; Loucks, 1999).

Segundo Loucks (1999) os sistemas de paleocavernas formam grandes reservatórios de hidrocarbonetos que não necessariamente são resultados do colapso de passagens das cavernas isoladas a alguns metros de profundidade e de dezenas a centenas de metros de comprimento, mais sim, a integração de vários sistemas de cavernas conectadas formando uma estrutura de milhares de metros de comprimento. Os resultados de colapsos e coalescências de muitas passagens e paredes das cavernas e estratificação que estão sobre o teto provocam uma enorme complexidade espacial interna.

As características gerais das paleocavernas colapsadas possuem uma boa descrição na literatura científica, como descrito em Loucks e Handford, 1992; Wilson et al, 1992; McMechan et al, 1998; Loucks, 1999; Combs et al., 2003). Contudo, ainda existem poucos dados sobre as caracterizações das estruturas internas de sistemas de paleocavernas colapsadas em reservatórios de hidrocarbonetos em formações carbonáticas.

O uso do método geofísico GPR na caracterização de feições deposicionais e deformacionais em formações carbonáticas vem atualmente mostrando bons resultados no imageamento de feições de afloramentos análogos, como constatado em (Beck e Wilson, 1988; Cai e McMechan, 1995; Casas et al, 1996; Zolotarev et al, 1996; McMechan et al, 1998; Sigurdsson e Overgaard, 1998; Dagallier et al, 2000; Pipan et al., 2000).

Neste sentido, este trabalho, propõe a aplicação do método Radar de Penetração no Solo (GPR) em um afloramento na Formação Jandaíra da Bacia Potiguar, constituído de inúmeras cavernas colapsadas.

O intuito desta pesquisa é imagear as geometrias internas das seqüências estratigráficas, possibilitando, dessa forma, a modelagem volumétrica de cavernas carbonáticas colapsadas e detectar a presença de falhas, fraturas e outras feições estratigráficas no afloramento de estudo.

Os resultados obtidos com esta pesquisa poderão fornecer embasamento para a construção de modelos que permitam uma melhor localização de furos, modelagem de poços horizontais, bem como interpretação sísmica das características de paleocavernas colapsadas.

No presente trabalho serão apresentadas as fácies identificadas em dados de fotomosaico e a identificação de paleocavernas em um arranjo 3D, a partir de dados 2D de perfis de GPR na região de Quixeré (CE).

**Localização da área**

A Bacia Potiguar

A Bacia Potiguar localiza-se na porção mais oriental do nordeste do Brasil, tendo suas porções emersas e submersas compreendidas entre os estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Ela se estende por aproximadamente 22.500 km<sup>2</sup> em sua porção emersa e por 26.500 km<sup>2</sup> em sua porção submersa, estando limitada a sul, leste e oeste com rochas do embasamento cristalino, ao norte com o oceano Atlântico e a noroeste com a Bacia do Ceará (SOARES, 2000).

Ela apresenta particularidades bem definidas, marcadas por uma tectônica do tipo *pull-apart* para sua porção submersa, enquanto na emersa, tem-se evidenciado um sistema de rifte tipo intracontinental (BERTANI et al., 1990; ARARIPE e FEIJÓ, 1994).

O preenchimento sedimentar da Bacia Potiguar está relacionado com as diferentes fases de sua evolução tectônica, sendo a Formação Pendência associada à fase rifte; a Formação Alagamar à fase transicional; e as Formações Açú, Ponta do Mel, Jandaíra, Ubarana, Tibau e Guamaré relacionadas à fase drifte (SOUSA, 1982).

A Formação Jandaíra apresenta-se parcialmente recoberta, na porção emersa da bacia, por rochas siliciclásticas da Formação Barreiras, já na porção submersa, por rochas das formações Ubarana, Tibau e Guamaré, interligando-se, lateralmente, com a parte inferior da Formação Ubarana (ARARIPE e FEIJÓ, 1994). Ela apresenta uma sequência marinha transgressiva carbonática Turoniana a Eocampaniana. A sequência marinha transgressiva compõe a fase drifte (BERTANI et al., 1990).

As rochas sedimentares da Formação Jandaíra foram depositadas em uma extensa plataforma carbonática que recobriu toda porção emersa da bacia, entre o Turoniano e o Mesocampaniano. Possui seu topo moldado por uma importante discordância neocampaniana, que marca o final da Sequência Transgressiva. Esta unidade constitui o litotipo dominante que aflora na Bacia Potiguar emersa, sendo constatadas em poços espessuras de até 600 m (SOARES, 2000).

Esta formação constitui a maior exposição de rochas carbonáticas não alteradas do Brasil. Em sua região aflorante, ela encontra-se intensamente erodida e carstificada, sob a forma de um platô, com mergulho suave para nordeste, no sentido do Oceano Atlântico sul (ARAUJO, 2008).

Afloramento Quixeré

O afloramento estudado encontra em Quixeré, na escarpa da estrada CE-377, próximo ao povoado de Serrinha no Ceará (Fig. 1).

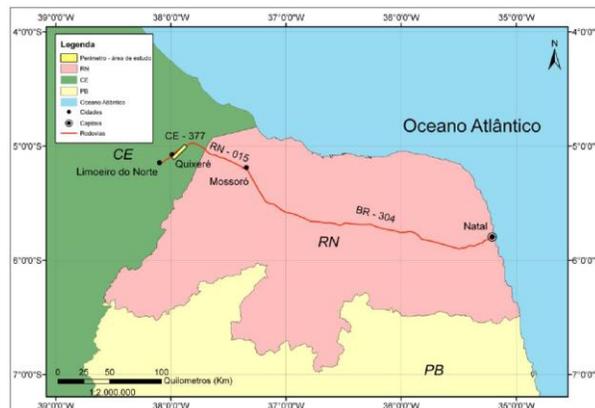


Figura 1 – Mapa de localização e acesso da área estudada (JESUS, 2010).

**Metodologia**

Identificação de tufas/espeleotemas

Jesus (2010) caracterizou as tufas/espeleotemas das paleocavernas colapsadas da área através da presença de conteúdo fossilífero, estalactites e estalagmites (Fig. 2) e, ainda, pela presença de estruturas caóticas de cavernas colapsadas (Fig. 2 e 3).



Figura 2 – Material carbonático de preenchimento das paleocavernas de Quixeré (CE).



Figura 3 – Visualização de tufa estratificada com laminações e brechas resultantes do colapso do teto da paleocaverna (JESUS, 2010).

### Perfis GPR

Os dados GPR foram adquiridos com o equipamento SIR-3000, fabricado pela empresa GSSI. Foram utilizadas as antenas de 400 MHz e 200 MHz, com janelas temporais de 100 ns e 185 ns, respectivamente. A Figura 4 mostra a localização das seções GPR realizadas na área estudada.



Figura 4 – Localização das seções GPR na região de Quixeré (CE).

Os dados adquiridos foram processados com o *software* REFLEXW versão 5.0, utilizando-se da sequência de processamento descrita a seguir: energy decay; band-passfrequency; running average; time-tepth conversion; correct 3D topography e conversão dos dados para o formato SEG-Y. Após processados, os dados foram inseridos no *software* OpendTedt versão 4.1.1, onde foi aplicado o atributo da energia para realçar as reflexões causadas pelas tufas.

### Resultados

A assinatura GPR padrão das tufas/espeleotemas das paleocavernas foi definido pela comparação direta entre seu afloramento em corte de estrada e uma seção levantada imediatamente acima (Fig. 5). As tufas/espeleotemas foram identificadas através de fortes refletores descontínuos e com formato de cunha, devido ao contato entre a base da paleocaverna e o teto colapsado.

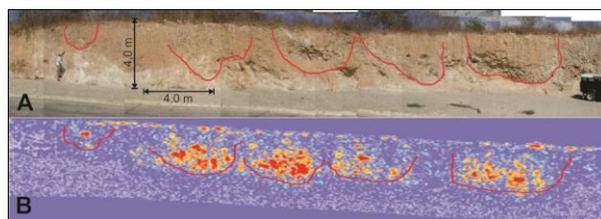


Figura 5 – Afloramento de tufas/espeleotemas em Quixeré (a) e sua resposta GPR padrão (b).

Na porção sul do afloramento, foi possível a identificação de pelo menos sete paleocavernas secundárias, variando aproximadamente entre 3 a 20 m de comprimento. Algumas destas apresentam continuidades laterais observáveis em seções GPR paralelas (volume em vermelho claro Fig. 6).

Já na porção central da área (Fig. 7), é possível a identificação de pelo menos cinco paleocavernas, com as maiores dimensões em toda a região do afloramento variando aproximadamente entre 11 a 30 m de comprimento. Contudo, devido à distância entre os perfis ser elevada e ao reduzido número de linhas de GPR adquiridas nesta área, ainda não é possível afirmar com precisão que estas paleocavernas tenham realmente o formato estimado.

Na porção mais a norte (Fig. 8), não foram mapeadas paleocavernas. A ausência de uma maior cobertura de seções GPR não permite correlacionar de forma consistente refletores descontínuos e de alta amplitude com paleocavernas nesta região.

Finalmente, a Figura 9 reúne todas as 13 paleocavernas identificadas nas seções GPR realizadas no afloramento de Quixeré, as quais apresentam comprimentos variados, entre 3 a 30 m, aproximadamente.

Pretende-se ainda realizar a aquisição de mais perfis no afloramento estudado, como a aquisição de um 3D na região mais a sul, bem como a realização de mais linhas transversais e longitudinais na área mais a norte.

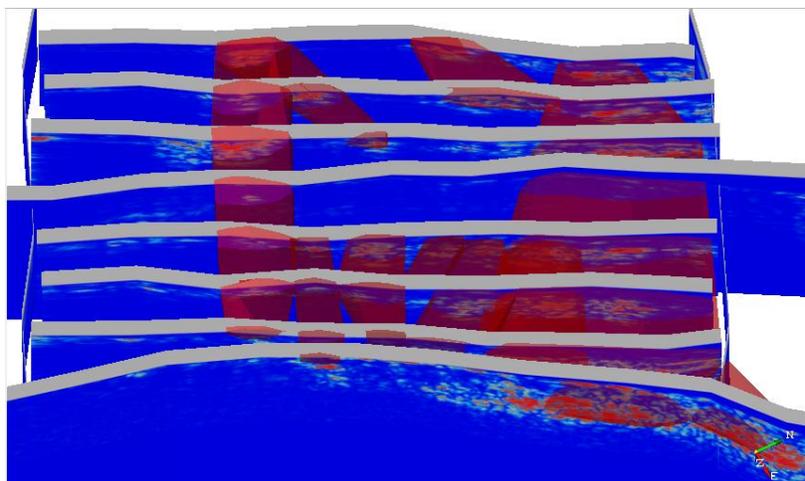


Figura 6 – Identificação das paleocavernas colapsadas na porção sul do afloramento de Quixeré.

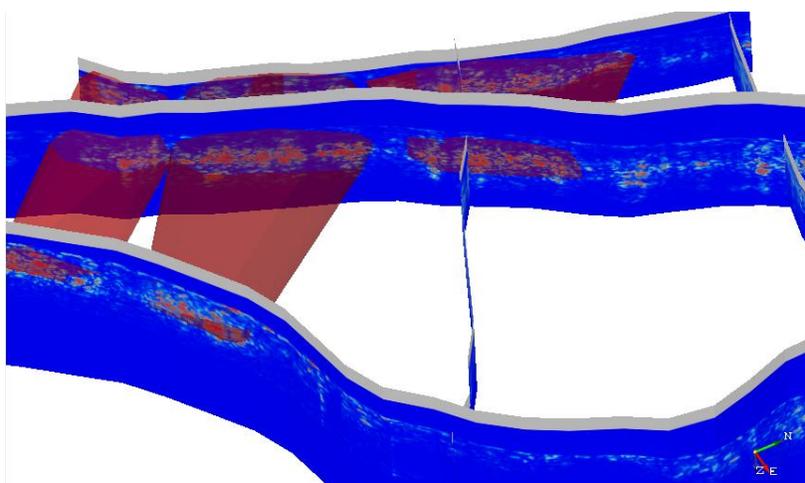


Figura 7 – Identificação de paleocavernas na porção central do afloramento de Quixeré.

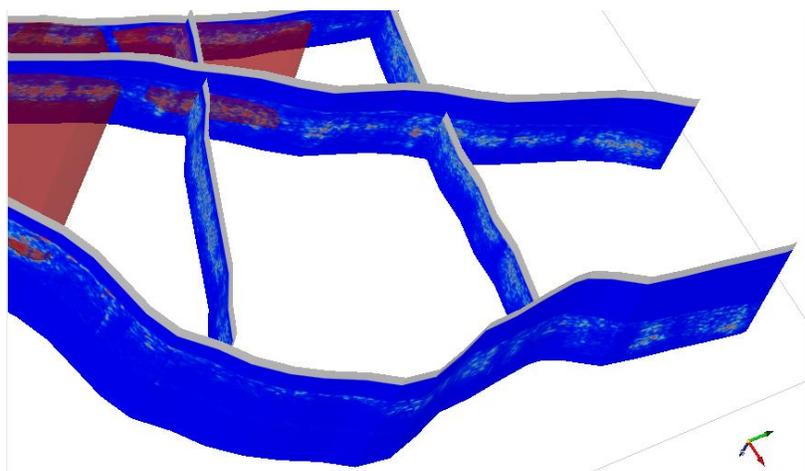


Figura 8 – Região mais a norte do afloramento, sem a identificação de paleocavernas.



Figura 9. Distribuição espacial das paleocavernas do afloramento de Quixeré identificadas nas seções GPR.

### Conclusões

A utilização do GPR para o imageamento de tufas/espeleotemas de paleocavernas colapsadas mostrou-se bastante satisfatória. Observou-se que a constituição das tufas/espeleotemas provocam um forte contraste da constante dielétrica entre estas e a rocha encaixante.

Através da análise do padrão de reflexão das tufas/espeleotemas, foi possível a identificação de pelo menos treze paleocavernas colapsadas na região de Quixeré (CE).

Entretanto, faz-se necessário que sejam realizadas mais linhas GPR longitudinais e transversais, principalmente nas áreas mais a norte do afloramento. Bem como a realização de aquisições 3D para uma melhor distinção entre as tufas e os depósitos de colapso de teto de caverna.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a Petrobrás pelo financiamento da pesquisa, através do Projeto Imageamento digital de afloramentos carbonáticos em paleocavernas colapsadas para elaboração de modelos estáticos 3D, PALEOCAVE. À CAPES pelas bolsas de pós-graduação de JARJ e TESJ e ao CNPq pela bolsa de produtividade de DLC.

### Referências

ARARIPE, P.T. e FEIJÓ, F.J.; 1994. **Bacia Potiguar**. Boletim de Geociências da Petrobrás, v. 8, n. 1, p.127-p.141.

ARAUJO, J. S. **Influências das tensões tectônicas na permeabilidade da Formação Açú – Bacia Potiguar**. Dissertação de mestrado. 2008. 100p.

BECK, B. F., and Wilson, W. L., 1988, **Interpreting ground penetrating radar profiles in karst terrane**: National Water Well Association Second Conference on Environmental Problems in Karst Terranes and their Solution, 347–367.

BERTANI, R. T.; COSTA I. G. e MATOS R. M. D. **Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na bacia Potiguar**. Origem e evolução de bacias sedimentares. PETBRAS, 1990.

Cai, J., and McMechan, G. A., 1995, **Ray-based synthesis of bistatic ground penetrating radar profiles**: Geophysics, 60, 87–96.

CANDELARIA, M. P., e REED, C. L., Eds., 1992, **Paleokarst related diagenesis and reservoir development: Examples from Ordovician-Devonian age strata of west Texas and the mid-continent**: Permian Basin Section SEPM 1992 Annual Field Trip.

CASAS, A., L'AZARO, R., VILAS, M., e BUSQUET, E., 1996, **Detecting karstic cavities with ground penetrating radar at different geological environments in Spain**: Proceedings, 6th International Conference on Ground Penetrating Radar, 455–460.

COMBS, D. M., R. G. LOUCKS, AND S. C. RUPPEL, 2003, **Lower Ordovician Ellenburger Group collapsed paleocave facies and associated pore network in the Barnhart field**, Texas, in T. J. Hunt and P. H. Luffholm, eds., The Permian basin: Back to basics: West Texas Geological Society Fall Symposium: West Texas Geological Society Publication No. 03-112, p. 397–418.

DAGALLIER, G., LAITINEN, A. I., MALARTRE, F., VAN CAMPENHOUT, I. P. A. M., E VEEKEN, P. C. H., 2000, **Ground penetrating radar application in a shallow marine Oxfordian limestone sequence located on the eastern flank of the Paris Basin, NE France**: Sedimen. Geol., 130, 149–165.

HOLTZ, M. H., e KERANS, C., 1992, **Characterization e classification of west Texas Ellenburger reservoirs**, in Candelaria, M. P., and Reed, C. L., Eds., Paleokarst related diagenesis and reservoir development: Examples from Ordovician-Devonian age strata of west Texas e the mid-continent: Permian Basin Section SEPM 1992 Annual Field Trip, 45–54.

JESUS, T. E. S., **Mapeamento de rochas carbonáticas da borda oeste da Bacia Potiguar e imageamento digital de paleocavernas colapsadas**. UFRN, Natal, Relatório de Graduação, 52 p. 2010.

LOUCKS, R. G., 1999, **Paleocave carbonate reservoirs: Origins, burialdepth modifications, spatial complexity, and reservoir implications**: AAPG Bull., 11, 1795–1834.

LOUCKS, R. G., e ANDERSON, J. H., 1985, **Depositional facies, diagenetic terranes, and porosity development in Lower Ordovician Ellenburger Dolomite, Puckett field, west Texas**, in Roehl, P.O., e Choquette,

P. W., Eds., Carbonate petroleum reservoirs: Springer-Verlag: 19–38.

LOUCKS, R. G., e HANDFORD, C. R., 1992, **Origin and recognition of fractures, breccias and sediment fills in paleocave-reservoir networks**, in Candelaria, M. P., and Reed, C. L., Eds., Paleokarst Related Diagenesis and Reservoir Development: Examples from Ordovician-Devonian Age Strata of West Texas and the Mid-Continent: Permian Basin Section SEPM 1992 Annual Field Trip, 31–44.

MENEZES, L. **Mapeamento digital de análogos a reservatórios petrolíferos: exemplo para depósitos fluviais da Unidade Açú-3 - bacia Potiguar**. UFRN/PPGG, Natal, Dissertação de mestrado, 118 p. 2004.

MCMECHAN, G. A., LOUCKS, R. G., ZENG, X., E MESCHER, P., 1998, **Ground penetrating radar imaging of a collapsed paleocave system in the Ellenburger dolomite, central Texas**: Appl. Geophys., 39, 1–10.

PIPAN, M., BARADELLO, L., FORTE, E., e PRIZZON, A., 2000. **GPR study of bedding planes, fractures and cavities in limestone**; in Noon, D. A., Stickey, G. F., and Longstaff, D., Eds., Proc., 8th Internat. Conf. on GPR, Expanded Abstracts, SPIE 4084, 682–687.

SANTOS, E. A., GUIMARÃES, L. J. N., COSTA, L. M., PONTES FILHO, I. D. S., A. P., COSTA. **Simulação de fluxo multifásico em análogo de reservatório de petróleo**. In: 2º Congresso Brasileiro de P&d em petróleo & gás, 2003.

SIGURDSSON, T., e Overgaard, T., 1998, **Application of GPR for 3D visualization of geological and structural variation in a limestone formation**: J. Appl. Geophys, 40, 29–36.

SOARES, U. M. **As relações entre tectonismo e sequências deposicionais no rifte Potiguar – Porção SW do Graben de Umbuzeiro, Bacia Potiguar emersa**. UFRN/PPGG, Natal, Dissertação de mestrado, 128 p. 2000.

SOUZA, S.M., 1982. **Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar**. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 32, Salvador. Anais..., v. 5, p. 2392-2406.1

STOUDT, E.L., 1996. **Precambrian–Devonian geology of the Franklin Mountains, west Texas—analogs for exploration and production in Ordovician and Silurian Reservoirs in the Permian Basin**. West Texas Geological Society 1996 Annual Field Trip Guidebook, West Texas Geological Society Publ. No. 96–100, 220 pp.

WILSON, J. L., R. L. MEDLOCK, R. D. FRITZ, K. L. CANTER, e GEESAMAN R. G., 1992, **A review of Cambro-Ordovician breccias in North America**, in M. P. Candelaria and C. L. Reed, eds., Paleokarst, karst related diagenesis and reservoir development: Examples from Ordovician–Devonian age strata of west Texas e the mid-continent: Permian Basin Section SEPM Publication No. 92-33, p. 19– 29.

ZOLOTAREV, V. P., GRIGORIEFF, K. N., GLOTOV, V. P., e STANZYTE, B., 1996, **Detection of cavities in**

**dolomite and profiling of alluvial deposits using GPR in Lithuania**: Proceedings, 6th International Conference on Ground Penetrating Radar, 445–448.