



## Aspectos do processamento GPR na estratigrafia de alta resolução em rochas carbonáticas

Jandyr M. Travassos, Liliane S. Franco, Observatório Nacional, Paulo T. L. Menezes, UERJ

Copyright 2004, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no I Simpósio de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo, 26-28 de setembro de 2004. Seu conteúdo foi revisado pela Comissão Tecno-científica do I SR-SBGf mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.*

### Resumo

This work uses some of the results obtained in a GPR survey done at a carbonate outcrop of the Coqueiro Seco Formation, Sergipe-Alagoas Basin. Those rocks can be considered as an analog of the Lagoa Feia reservoirs in Campos Basin. We concentrate here on a fixed-offset profile done on one of the four levels of a quarry. It is shown here that judicious processing is a necessity if one wants to achieve any success in performing a stratigraphic work based on GPR sections. A crucial step in that is the spectral balancing of the GPR traces, in order to restore their spectral contents to a certain degree. The processing described here allowed an improved geophysical recovery of the geologic features.

### Introdução

A análise estratigráfica de alta resolução de afloramentos pode ser utilizada na construção de modelos arquiteturais quantitativos de reservatórios. Parâmetros importantes, tais como porosidade e geometria de reservatórios, fatores que influenciam na definição de reservas e na produção de petróleo, podem ser quantificados desta maneira.

Embora os principais tipos de rocha-reservatórios, estejam associados a arenitos turbidíticos (Ceia et al., 2001; Bruhn, 1994; Hardage et al. 1998), cerca de 50% do petróleo é produzido em ambientes carbonáticos. Esse tipo de reservatórios apresenta uma série de problemas na produção de hidrocarbonetos devido à heterogeneidade do seu sistema poroso. Tornando-se altamente necessário a realização de estudos de modelagem, no sentido de aumentar a produtividade e a prospectividade desses reservatórios (Wang et al., 1998a; Wang et al., 1998b).

A modelagem de reservatórios tem sido realizada basicamente através de estudos geológicos (Fanha, 1995; Wang et al., 1998a), e geofísicos, utilizando basicamente a sísmica de alta resolução (Hardage et al., 1998; Wang et al., 1998b). Estudos recentes de utilização de GPR em sedimentos são prova da sua capacidade de produzir imagens de detalhe da sua estratigrafia (e.g., Davis e Annan, 1989). O método presta-se efetivamente ao estudo da estratigrafia de corpos aflorantes de sedimentos clásticos (McMechan et al., 1997). No entanto é de se esperar que o GPR apresente uma eficácia em rochas carbonáticas, comparável a que é possível obter em turbiditos.

Aqui utilizamos dados obtidos em um afloramento de bancos carbonáticos da Formação Coqueiro Seco, Bacia de Sergipe-Alagoas, para ilustrar a importância de um processamento judicioso de dados GPR, na reconstituição da estratigrafia de alta resolução. Esse é um afloramento de coquinas, lito-estratigraficamente correlatas às da Formação Lagoa Feia, Bacia de Campos. Trata-se, portanto, um importante análogo de rochas-reservatório.

A reconstituição eletromagnética da subsuperfície pode fornecer um importante subsídio à modelagem do reservatório carbonático, na medida que tenha sucesso em reproduzir as suas feições estruturais. No entanto há um compromisso entre a profundidade de penetração e a resolução, de modo que quanto mais fundo estiver um refletor, menor será a resolução de sua imagem. Isto é um resultado direto da degradação espectral do sinal, resultado da maior absorção das frequências mais elevadas. Tal fator não pode ser compensado por meio da aplicação de um simples passa-banda e ganho. É necessária a aplicação de uma etapa de balanceamento espectral, que venha a amenizar esta perda de resolução com a profundidade. O balanceamento espectral normalmente é realizado na sísmica por meio de deconvolução (whitening), seguido de um filtro passa-banda, produzindo traços com espectros apresentando o mesmo RMS (Yilmaz, 2001). A deconvolução normalmente não produz bons resultados em dados GPR, devido às suposições de fase mínima e estacionaridade para o wavelet, que não são apropriados para o GPR. A rápida atenuação da amplitude do sinal GPR torna muito difícil a aplicação da deconvolução.

O balanceamento espectral no nosso conjunto de dados permitiu uma melhora significativa para tempos longos, permitindo o aparecimento de outros problemas, como um padrão cruzado, indicativo de aliasing na seção. Isto impõe etapas adicionais de processamento para melhorar a seção. Vários trabalhos utilizam o balanceamento espectral de seções GPR (Young & Sun 1999; Neto & Medeiros, 2003). Neste paper mostra-se que isto pode ser realizado de maneira simples e efetiva.

### Área de Estudo e Fonte de Dados

Os melhores afloramentos dos bancos carbonáticos e as coquinas, associados à Formação Coqueiro Seco, ocorrem em cortes de pedreiras na região em torno da

cidade de Maceió. O levantamento GPR aqui descrito foi realizado em uma delas, na denominada Pedreira do Atol (Fig. 1), localizada no município de São Miguel dos Campos, Alagoas, distante cerca de 60 km da Capital Maceió. A Pedreira do Atol possui três grandes cavas, apenas uma delas, São Miguel, encontra-se em produção. Todo o levantamento de campo foi realizado nessa cava, cujas principais unidades litológicas são coquinas com folhelhos fossilíferos na base e folhelhos e siltitos, com intercalações carbonáticas no topo.

A técnica GPR é um método eletromagnético que emprega ondas de rádio entre 1 MHz e 1 GHz para adquirir informações sobre a subsuperfície. Está bem estabelecida, sendo largamente utilizada no estudo da estratigrafia sedimentar em afloramentos de interesse para o estudo de reservatórios (McMechan et al., 1997). Ao leitor interessado recomendamos referir à literatura especializada (Annan e Cosway, 1992; Daniels, 1996; Davis & Annan, 1989; Fisher et al, 1992).

A campanha de coleta dos dados GPR foi realizada em agosto de 2002 em quatro níveis diferentes da mina, a céu conforme mostra a Figura 1. Foram utilizadas as configurações offset fixo e variável (WARR, CMP), este último utilizado na estimativa da velocidade de propagação das ondas no meio. Foi utilizado um Pulse Ekko 100 da Sensors & Software, com antenas de 100 MHz e pulser de 1000 V. As antenas foram transportadas à mão ao longo dos perfis, em uma configuração broadside perpendicular, com offset fixo de 0.8 m.



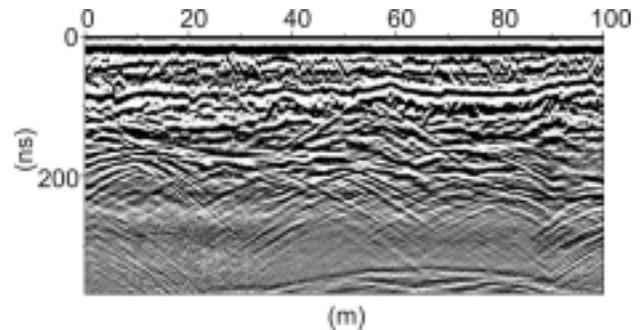
**Figura 1.** Bancadas da cava São Miguel da Pedreira do Atol. A posição do perfil GPR no nível 0 da pedreira está assinalado por um segmento de reta. A seta indica um nível proeminente de folhelho fossilífero.

## Resultados

A área é caracterizada por uma velocidade baixa de e baixa penetração, limitada a 15 m. A relativamente rápida atenuação do sinal limita a eficácia dos perfis CMP, que mostram um único máximo a  $v=0.08$  m/ns. Estes valores contrastam com o esperado em um terreno predominantemente de rochas carbonáticas.

A Figura 2 apresenta a seção GPR obtida no nível 0, com um fluxo de processamento mínimo. Aqui só estão contempladas as etapas de dewow, filtragem e ganho. Trata-se de uma seção de boa qualidade, com uma boa

dose de recuperação da subsuperfície para tempos acima de 200 ns. Tempos maiores são caracterizados por uma faixa relativamente transparente, onde predominam difrações aéreas, até um nível próximo de 350 ns, onde um refletor proeminente é aparente.



**Figura 2.** Resultado de um processamento mínimo.

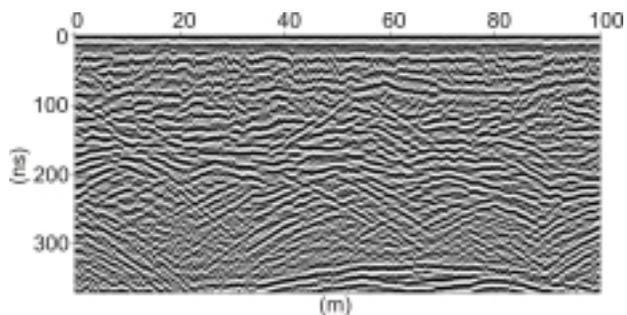
No entanto há problemas com a seção da Figura 2. O primeiro diz respeito à perda do conteúdo espectral do sinal, resultado da absorção do sinal, efeito que se mostra mais agudo, quanto maior for a frequência. Este efeito de degradação do sinal faz com que o espectro correspondente à seção da Figura 3 apresente um máximo em torno de 60 MHz, quando nominalmente seria 100 MHz. O segundo problema é a ocorrência de um padrão cruzado, evidente para TWT maiores que 150 MHz, que se assemelham a alias espacial. O último problema a ser resolvido são as difrações aéreas.

O problema da degradação do sinal GPR deve ser resolvido através de uma reconstituição espectral. A simples aplicação de um passa-banda, obviamente não resolve o problema. Adotamos aqui um procedimento de balanceamento espectral simples, que é capaz de trazer o conteúdo espectral dos dados, mais para próximo do esperado. O procedimento consiste na aplicação de um banco de 5 filtros passa-banda paralelos, seguidos de uma fase de ganho e estaqueamento espectral. O resultado estaqueado é novamente filtrado com um passa-banda, de modo a minimizar o ruído resultante do procedimento anterior. Como resultado, a amplitude máxima do espectro migra de 60 MHz para 90 MHz, um desvio do valor nominal de apenas 10%. O espectro de fase torna-se mais regular, após a fase de balanceamento. O resultado é uma seção com uma melhora significativa dos tempos acima de 200 MHz, conforme mostra a Figura 3.

A melhora da seção GPR permite a visualização de alguns aspectos, antes ocultos pela degradação espectral do sinal em tempos maiores que 200 ns. Há um padrão de interferência, semelhante a alias, que pode ser resolvido satisfatoriamente através de filtragem F-K.

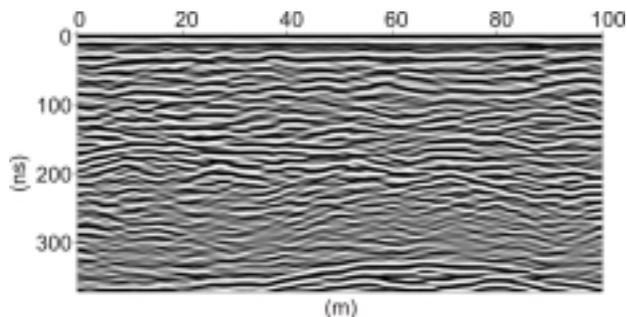
As difrações aéreas e do meio poderiam ser resolvidas por meio de migração. No entanto tal procedimento resultaria em uma contaminação da seção por smiles, solução muito longe de ser satisfatória. Uma solução mais indicada é a filtragem dip, que alivia o problema das difrações de maneira satisfatória. Um corte de velocidade

acima de 0.2 m/ns é suficiente para minimizar as difrações de origem aérea.



**Figura 3.** Seção resultante do balanceamento spectral e filtragem adicional.

A Figura 4 mostra a seção GPR da Figura 3, após filtragem F-K e dip. A melhora nos dados é mais manifesta após TWT = 150 ns.



**Figura 4.** Seção final, após o processamento sugerido neste trabalho.

### Conclusões

Os resultados deste trabalho mostram a importância de um processamento judicioso no trabalho de reconstituição eletromagnética da estratigrafia de subsuperfície. O balanceamento espectral tem uma posição de destaque nesse esforço. Uma correção simples, baseada somente na análise espectral do traço, permite centralizar o espectro, próximo da frequência nominal de emissão, corrigindo parcialmente a atenuação diferenciada do sinal. As demais fases do processamento removem os artefatos, antes invisíveis, para tempos acima de 200 ns.

Uma vez judicialmente processados, os dados GPR podem fornecer um importante subsídio a modelagem de um reservatório, ao reproduzir as suas feições estruturais.

### Agradecimentos

O suporte financeiro ao levantamento de campo foi fornecido pelo convenio PADCT/CTPETRO/FINEP/ UERJ/FINEP 64.0003.83.00. Os autores agradecem o suporte logístico dado pela Cia Cimento do Atol durante a

realização dos trabalhos de campo. LSF agradece bolsa de estudos CAPES.

### Referências

- Annan, A.P. & Cosway, S.W., 1992, Ground Penetrating Radar Survey, Design, Annual Meeting of SAGEEP, Chicago, April, 26-29.
- Brunh, C.H.L 1994, Estratigrafia de alta resolução, geometria de reservatório e caracterização faciológica de turbiditos cretácicos e terciários de bacias brasileiras de margem passiva. Boletim Geociências da PETROBRAS, 9, 2, 408.
- Ceia, M., Carrasquilla, A., Travassos, J.M., 2001, Levantamento GPR em afloramentos turbidíticos da Bacia de Almada-BA, (a ser apresentado no) 7º Congresso da SBGf, Salvador, outubro de 2001.
- Daniels, D.J., 1996, Surface-Penetrating Radar. IEE, London, UK, 300p.
- Davis, J.L.; Annan, A.P. 1989, Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy, Geophysical Prospecting, 37, 351-551.
- Fisher, E., McMechan, G.A., & Annan, A.P., 1992, Acquisition and Processing of wide-aperture Ground Penetrating Radar data, Geophysics, v.57, n.3, 495-504.
- Hardage, B.A.; Pendleton, V.M.; Simmons Jr., J.L; Stubbs, B.A.; Uszinski, B.J. 1998, 3-D instantaneous frequency used as a coherence continuity parameter to interpret reservoir compartment boundaries across an area of complex turbidite deposition. Geophysics, 63, 1520-1531.
- McMechan, G.A., Gaynor, G.C., and Szerbiak, R.B., 1997, Use of ground-penetrating radar for 3-D sedimentological characterization of clastic reservoir analogs. Geophysics, 62, 786-796.
- Neto, P.X., Medeiros, W.E., 2003, Uma abordagem prática para corrigir os efeitos de propagação no sinal do GPR, e sua importância na melhoria do imageamento, CDROM do 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro.
- Wang, F.P; Lucia, F.J; Kerans, C. 1998a, Modeling dolomitized carbonate ramp reservoirs: A case study of the semihole San Andres unit- Part I, petrophysical and geologic characterizations. Geophysics, 63, 1866-1875.
- Wang, F.P.; Daí, J.; Kerans, C. 1998b, Modeling dolomitized carbonate ramp reservoirs: A case study of the semihole San Andres unit- Part II, seismic modeling, reservoir statistics, and reservoir simulation. Geophysics, 63, 1876-1884.
- Yilmaz, O. 2001, Seismic data analysis, Society of exploration Geophysicist, Investigation in Geophysics Nº 10, vols. 1, 2, Tulsa, OK.

Young, R. A. and Sun, J., 1999, Revealing stratigraphy in ground-penetrating radar using domain filtering, *Geophysics*, 64, 435-442.