



Uma abordagem prática para corrigir os efeitos de propagação no sinal do GPR, e sua importância na melhoria do imageamento.

*Pedro Xavier Neto ¹, pedroxavier@petrobras.com.br, e Walter Eugênio de Medeiros ^{2,3}, walter@dfe.ufrn.br

1- PETROBRAS/UN-RNCE/ATEX/PS, Natal, RN.

2- Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica – PPGG/UFRN, Natal, RN.

3- Depto. de Física Teórica e Experimental– UFRN/CCET, Natal, RN.

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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.

Resumo

Ao se propagar no meio geológico, o pulso do GPR sofre atenuação por efeitos combinados de absorção e dispersão. Esses efeitos de propagação provocam a degradação da qualidade da imagem e ocorrem segundo mecanismos que dependem da frequência de excitação da onda e das características elétricas do meio. Para conseguir um bom imageamento deve-se corrigir os efeitos de propagação, o que passa, geralmente, pela necessidade de conhecimento dos atributos do meio, notadamente o fator Q (*quality factor*), o que nem sempre é possível na prática dos levantamentos de GPR.

Neste trabalho é apresentada uma abordagem prática de correção dos efeitos de propagação, baseada no processamento sísmico e adaptada para o GPR. Os principais recursos utilizados são o ganho esférico e exponencial (SEC) e o balanceamento espectral. Será mostrada em dados reais a expressiva melhoria da qualidade do imageamento, obtida a partir da técnica descrita neste trabalho.

Introdução

O GPR emite um pulso de curta duração (da ordem de ns) na faixa de frequência de VHF/UHF. Ao se propagar no meio geológico, o pulso sofre atenuação (termo que designa conjuntamente mudanças de amplitude e forma do pulso) por efeitos combinados de absorção e dispersão. A absorção diz respeito à perda de amplitude do pulso, à medida que o mesmo se propaga, como resultado da dissipação da energia por conversão em calor (efeito Joule); a dispersão envolve o alargamento temporal do pulso ou, mais genericamente, a mudança da forma do pulso devido aos efeitos de variação com frequência dos parâmetros descritivos do meio físico, notadamente velocidade e coeficiente de atenuação. O pulso de GPR sofre ainda diminuição de amplitude devido ao efeito puramente geométrico do aumento da distância até a fonte. A atenuação do pulso de GPR é mais pronunciada nas componentes de alta frequência do sinal (Jol, 1995; Annan, 1996; Bano, 1996; Plumb, 1998) e se manifesta no radargrama

principalmente como perda de resolução com profundidade.

Dado o forte impacto dos efeitos de propagação no pulso de GPR, vários estudos têm sido realizados com o objetivo de caracterizar precisamente estes efeitos e encontrar formas de corrigi-los. Em geral esses estudos compreendem geração de modelos sintéticos para estudos comparativos com dados reais (Bano, 1996; Hollender & Tildard, 1998), medidas de atributos elétricos do meio em laboratório e em campo (Powers, 1997; Turner & Siggins, 1994), e aquisições segundo *patterns* de tomografia (Bano, 1996; Hollender & Tildard, 1998) ou segundo condições experimentais controladas (Turner & Siggins, 1994) que permitam a perfeita identificação e separação, nos dados de GPR, dos pulsos enviado e recebido. Estes trabalhos oferecem contribuições muito importantes para o entendimento dos fenômenos que ocorrem com a onda de GPR no meio geológico. Em geral, contudo, os procedimentos resultantes para correção dos efeitos de propagação demandam o conhecimento de medidas de atributos elétricos do meio e usam uma abordagem determinística de deconvolução, o que tem limitado a sua aplicação prática a casos de tomografia em meios homogêneos.

Neste trabalho, discutimos o problema da correção prática dos efeitos de propagação em dados de GPR, com base na influência que têm estes efeitos no espectro do sinal. Este fato permite formular a hipótese de que a utilização de procedimentos que promovam a correção da distribuição de frequências no espectro de amplitudes do sinal do GPR, também corrige os efeitos de propagação. Esta hipótese foi testada e comprovada neste estudo. O ponto chave da abordagem proposta é o reconhecimento de que, em meios dielétricos de baixa ou moderada perda, a propagação produz grandes mudanças na amplitude do sinal, mas deixa praticamente inalterado o espectro de fase. Do ponto de vista metodológico, não serão aqui apresentadas novas abordagens ou ferramentas para correção dos efeitos de propagação. Com base no fato de que a propagação produz mudanças significativas apenas no espectro de potencia do sinal, o nosso objetivo é demonstrar, com o estudo de casos reais, que a utilização judiciosa e integrada das ferramentas bem conhecidas de ganho e balanceamento espectral é suficiente para efetuar uma boa correção dos efeitos da propagação.

O balanceamento espectral procura compensar o efeito seletivo da atenuação das altas frequências intervindo também seletivamente no dado através de ganhos diferenciados por faixas de frequências. Como resultado a imagem experimenta uma expressiva melhoria na sua qualidade com o incremento da resolução e da profundidade de investigação.

Outros autores já utilizaram o balanceamento espectral visando aumentar a resolução vertical de dados de GPR (Zeng et al 1995; Plumb et al 1998; Young & Deng, 1995; Sun & Young 1995; Young & Sun 1999). A contribuição do presente trabalho é evidenciar que o balanceamento espectral, em conjunto com ganho, pode ser especificamente utilizado de modo a corrigir os efeitos de propagação.

Efeitos da propagação no pulso do GPR

A forma geral da solução da equação da onda plana em uma dimensão é (Turner & Siggins, 1994):

$$A(x, t) = A_0 \exp(-\alpha x) \exp[i\omega(t - \frac{x}{v})] \quad (1)$$

em que $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$ é o valor do campo elétrico na posição \mathbf{x} e no instante t , $\mathbf{A}_0 = A(0, 0)$, α é o coeficiente de atenuação, \mathbf{x} é a direção de propagação, $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular e \mathbf{v} é a velocidade de fase da onda. Em geral, α e \mathbf{v} são dependentes de frequência.

Os sistemas de GPR atuais, que usam fontes impulsivas, geram um pulso de duração finita T em intervalos regulares de tempo, cuja transformada de Fourier de primeira ordem corresponde a uma determinada largura de faixa de frequência Δf , que costuma ser caracterizada por sua frequência central f_c (figura 1).

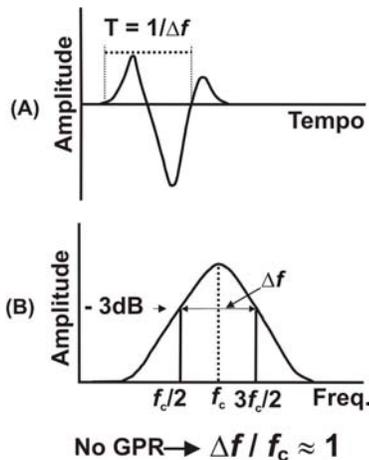


FIGURA 1

Representação do sinal do GPR nos domínios do tempo (A) e da frequência (B). Os sistemas de GPR são concebidos para terem $\Delta f \cong f_c$.

O pulso finito de GPR pode ser entendido como sendo composto pela superposição de ondas monocromáticas da forma (1). Devido ao fato da fonte ser finita, a amplitude do pulso resultante sofre também o efeito do espalhamento geométrico. Este espalhamento acarreta apenas diminuição de amplitude, sendo um fator puramente geométrico que não depende das características físicas do meio e nem da frequência (Olhoeft, 1998). Desse modo, para um meio constituído por um dielétrico perfeito ($\alpha = 0$), o pulso recebido na antena receptora teria uma forma idêntica ao pulso emitido (Annan, 1996). Para um meio real, contudo, é sempre necessário incorporar os efeitos da atenuação.

A atenuação é descrita de modo mais conveniente através do fator de qualidade Q , que representa a relação

entre a energia armazenada e a energia dissipada por ciclo (Bano, 1996):

$$Q = \frac{\omega}{2\nu\alpha} \quad (2)$$

Manipulando-se as equações (1) e (2) obtém-se:

$$A(f, t) \propto \exp\left(\frac{-\pi f t}{Q}\right) \quad (3).$$

A expressão (3) mostra que a amplitude decai exponencialmente em função do número de períodos contidos em cada componente de frequência do sinal, o que implica que a absorção tem caráter seletivo, sendo mais acentuada nas componentes de mais alta frequência. Em consequência, a amplitude do espectro diminui e ocorre um deslocamento da frequência central na direção das componentes de mais baixa frequência, em acordo com a expressão (3). Este efeito foi também identificado por Jol (1995) em dados reais. Conhecendo-se Q , pode-se fazer a correção do efeito da propagação em um meio homogêneo através de um filtro inverso (Turner & Siggins, 1994).

A questão que se impõe é que a determinação do valor de Q para um dado meio, depende de medidas de atributos elétricos feitas em laboratório, ou em condições de aquisição específicas, notadamente levantamentos de tomografia. Na prática do GPR quase nunca se dispõe de medidas de atributos do meio ou de condições para se fazer medidas de atributos da onda, o que acaba inviabilizando a correção dos efeitos de propagação a partir da determinação do fator Q .

Para superar essa dificuldade nós utilizamos para corrigir os efeitos de propagação duas ferramentas bem conhecidas no processamento de dados sísmicos: a correção esférica e exponencial e o balanceamento espectral, que serão sucintamente descritos a seguir.

Correção esférica e exponencial (spherical and exponential correction-SEC).

A SEC atua através da aplicação de uma função de ganho linear, para corrigir o efeito de diminuição de energia com o afastamento da fonte (espalhamento geométrico), e de uma função de ganho exponencial, que atua compensando o efeito da perda de amplitude por absorção. A SEC atua da mesma forma em todo o espectro de amplitudes e não corrige seletivamente a perda de componentes de altas frequências do sinal.

A função de ganho $G(t)$ tem a forma:

$$G(t) = (1 + a^*t) \exp(b^*t) \quad (4),$$

onde $a = a' / \text{largura do pulso}$ e $b = b^*(v / 8.69)$. A largura do pulso pode ser determinada a partir da frequência nominal central da antena. Os parâmetros a' (ganho linear- adimensional) e b' (ganho exponencial-em dB/m) devem ser fornecidos, assim como a velocidade v (m/ns).

Como a função de ganho (4) tende a ser mais efetiva nos tempos maiores (maior distância da fonte), deve-se evitar recuperar a amplitude de frequências espúrias, normalmente altas frequências, associadas a ruídos, e que normalmente ocorrem nos tempos maiores no traço do GPR.

Balanceamento espectral (*spectral whitening*)

O balanceamento espectral corrige os efeitos da atenuação de forma seletiva, por faixas de frequências, e promove uma deconvolução parcial nos dados, sem promover grandes alterações na fase do sinal. A figura 2 mostra esquematicamente o funcionamento do processo de balanceamento espectral.

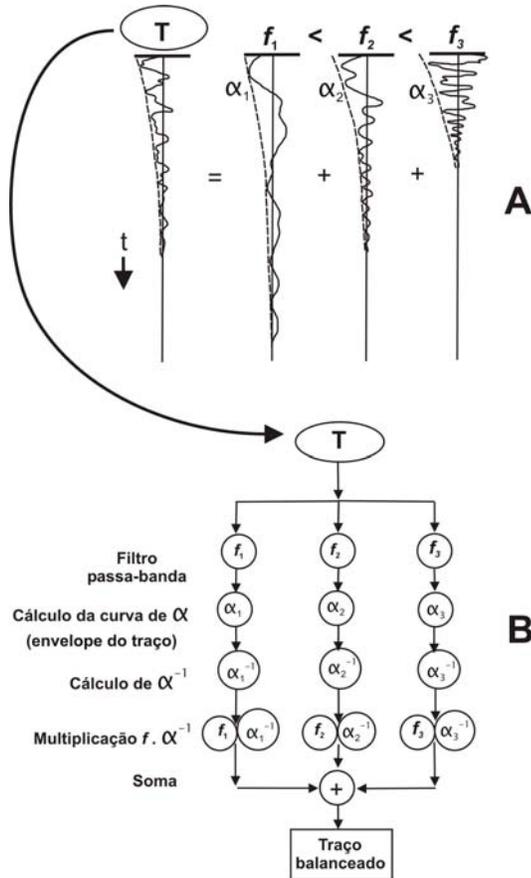


Figura 2 – Representação esquemática do balanceamento espectral.

A figura 2A representa um traço de GPR (T) composto por várias componentes de frequência (f_1, f_2, f_3). Cada componente possui uma atenuação específica ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$), sendo que as componentes de mais altas frequências são mais fortemente atenuadas.

Uma série de filtros passa-banda é então aplicada ao traço T de sorte a discriminar diferentes faixas de frequências (figura 2B). São então determinadas as curvas de decaimento de amplitude (envelope) para cada faixa de frequência bem como a função inversa desse decaimento. As funções inversas de decaimento são então aplicadas em cada faixa de frequência anteriormente discriminada e os resultados são somados, para obter o traço balanceado. Para preservar as características de amplitude do traço original (T), esta soma é multiplicada pela curva decaimento de amplitude do traço original.

A atuação do balanceamento espectral se aproxima de uma deconvolução de fase zero e tende a

ser mais eficaz do que os processos de deconvolução convencionais (*spike* e *predictive deconvolution*) quando aplicado a sinais com amplas larguras de faixas e ampla faixa dinâmica (Yilmaz, 1987), como é o caso do GPR.

Deve-se ressaltar que o sinal de GPR é de fase mista e portanto a aplicação direta de algoritmos de deconvolução da sísmica não fornecem em geral bons resultados.

Exemplo de aplicação em dados reais

A figura 3 apresenta uma área industrial da PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S/A) localizada no estado do Ceará, Nordeste do Brasil, onde foram realizados levantamentos com GPR objetivando investigar a presença de estruturas de dissolução originadas pela presença de um substrato calcário. Neste substrato calcário desenvolveu-se um kárstico com paleotopografia muito irregular, onde ocorrem cavernas e fraturas que funcionam como condutos para a infiltração de fluidos. As fraturas são preenchidas, total ou parcialmente, por um regolito resultante da alteração do calcário, e por sedimentos mais recentes. A cobertura sedimentar é composta por um solo areno-argiloso cuja espessura na área varia de 0 a 30 metros.

A área industrial foi construída sobre um aterro, com cerca de 2 metros de espessura, sobre o qual foram edificadas diversas facilidades de produção, armazenamento e escoamento de petróleo, tais como, tanques, estações de vapor e edificações.

O objetivo do levantamento foi o de avaliar a integridade do aterro e investigar a presença de fraturas e de elementos de dissolução que pudessem evoluir para o aparecimento de dolinas, que têm alto potencial de gerar danos às instalações da empresa.

A área localiza-se numa região de clima semi-árido com baixa densidade pluviométrica. O período de chuvas, quando ocorre, vai de dezembro a abril. As dolinas aparecem com maior frequência logo após o período de chuvas, devido ao aumento do fluxo hidrológico descendente que catalisa a dissolução do preenchimento das fraturas.

O clima árido e o solo seco, referendam a utilização do GPR na investigação do substrato kárstico da área. Entretanto, em períodos de chuvas, a saturação do solo areno-argiloso provoca uma forte atenuação da onda do GPR. Por este motivo escolhemos uma linha levantada logo após o período de chuvas para demonstrar, em condições desfavoráveis à utilização do GPR, que a utilização das técnicas de processamento acima referidas promovem uma melhoria considerável na qualidade do imageamento.

O levantamento foi realizado com uma antena monostática de 200 MHz, com 150 ns de range e amostragem espacial igual a 1 scan/0.05 m. A amostragem temporal foi de 1 amostra por ns. A linha foi levantada numa área onde ocorrem elementos de escoamento e controle de produção de petróleo enterrados, tais como dutos e caixas de concreto que acondicionam válvulas de fluxo. O comprimento da linha foi de 65 metros.

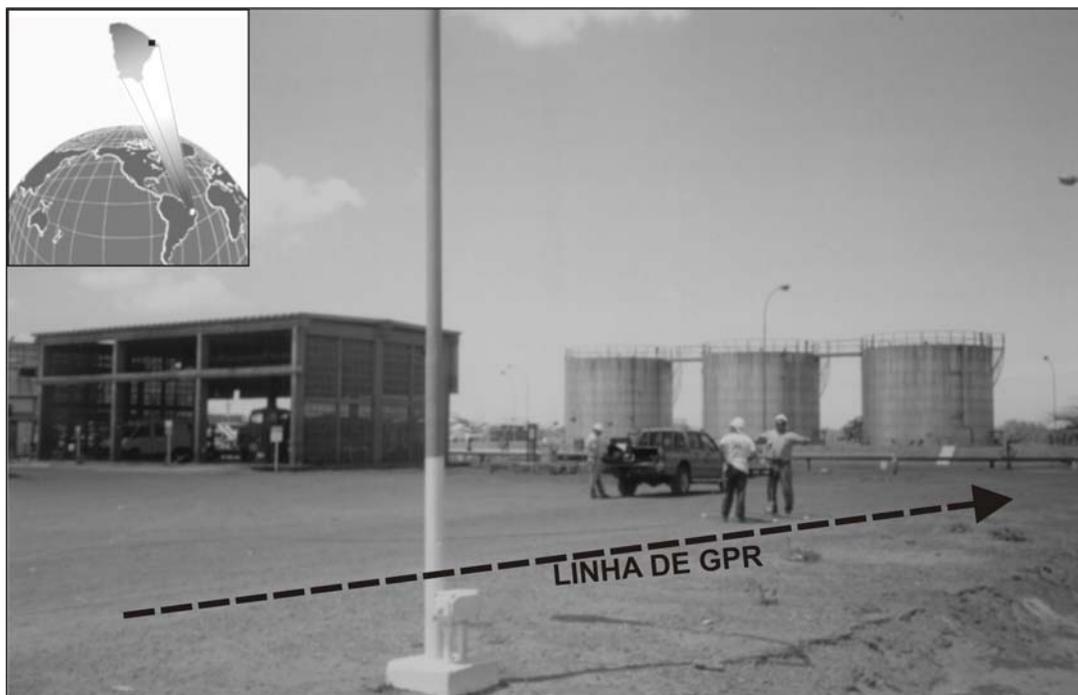


Figura 3 – Localização da área do levantamento de GPR.

O processamento constou de correção para zero offset (zero time correction), dewow, background removal, ganho esférico e exponencial (SEC), balanceamento espectral, migração kirchhoff e filtro de frequências tipo passa banda. O SEC foi parametrizado segundo os seguintes valores que compõe a relação (4): Os parâmetros **a** (adimensional) e **b** (dB/m) foram escolhidos como sendo 3 e 6, respectivamente. O tempo inicial para aplicação correspondeu a 0 ns e o valor máximo de ganho, valor adimensional, foi escolhido no caso como o valor equivalente a 500. No balanceamento espectral utilizou-se na entrada do algoritmo as frequências de 80 MHz e 320 MHz como limites inferior e superior da faixa de espectro. Utilizou-se uma velocidade constante para a migração e conversão tempo/profundidade equivalente a 0.09 m/ns. Esta velocidade foi obtida a partir de análise de CMPs levantadas na área. A utilização de velocidade constante se justifica pelo fato de não serem esperadas grandes variações laterais de velocidade no local do levantamento. Utilizou-se um filtro passa banda parametrizado da seguinte forma: limite inferior de corte – 15 MHz; limite inferior da banda passante – 90 Mhz; limite superior da banda passante – 350 Mhz; limite superior de corte – 520 MHz (15-90-350-520).

A seguir serão apresentados dois resultados para a linha levantada na área. O primeiro (figura 4), representa o resultado final do processamento descrito acima, porém sem a aplicação do balanceamento espectral, enquanto a figura (5) mostra o resultado final do processamento com a aplicação do balanceamento espectral. Todos os outros parâmetros foram aplicados com os mesmos valores em ambos os resultados.

A seção em 4 mostra que é possível visualizar o limite inferior do aterro somente até uma profundidade em torno de 1.3 m (30 ns), conforme é mostrado no retângulo destacado em A. No retângulo B aparece um duto de vapor, sendo mais evidente as difrações resultantes do espalhamento de energia, mesmo após a seção migrada. Em C, aparece o limite superior de uma caixa de concreto, além de difrações remanescentes que marcam a posição da caixa.

A figura 6 mostra o espectro de amplitude da seção 4 após aplicada a seqüência de processamento descrita acima, porém sem o balanceamento espectral. Note que o espectro está centralizado em torno da frequência de 170 MHz, o que demonstra que houve um deslocamento de cerca de 30 MHz a partir da frequência central nominal da antena (200 MHz).

A figura 5 mostra o resultado da aplicação do balanceamento espectral na seção. O retângulo em destaque em A, mostra que houve uma melhoria significativa da delineação do limite inferior do aterro (comparar com o retângulo A da figura 4), com uma definição clara deste limite em torno de 50 ns, equívulendo a 2.5 metros. O retângulo em destaque em B, mostra o posicionamento do duto com uma melhor definição espacial. Já o retângulo C mostra a melhoria obtida na definição dos limites da caixa de concreto, podendo ser perfeitamente identificados tanto o topo quanto a base da referida caixa (setas brancas).

A figura 7 mostra o espectro de amplitude da seção 5 o qual, comparado com o espectro em 6, mostra que o balanceamento espectral de fato não provoca grande alteração de fase, conforme discutimos anteriormente.

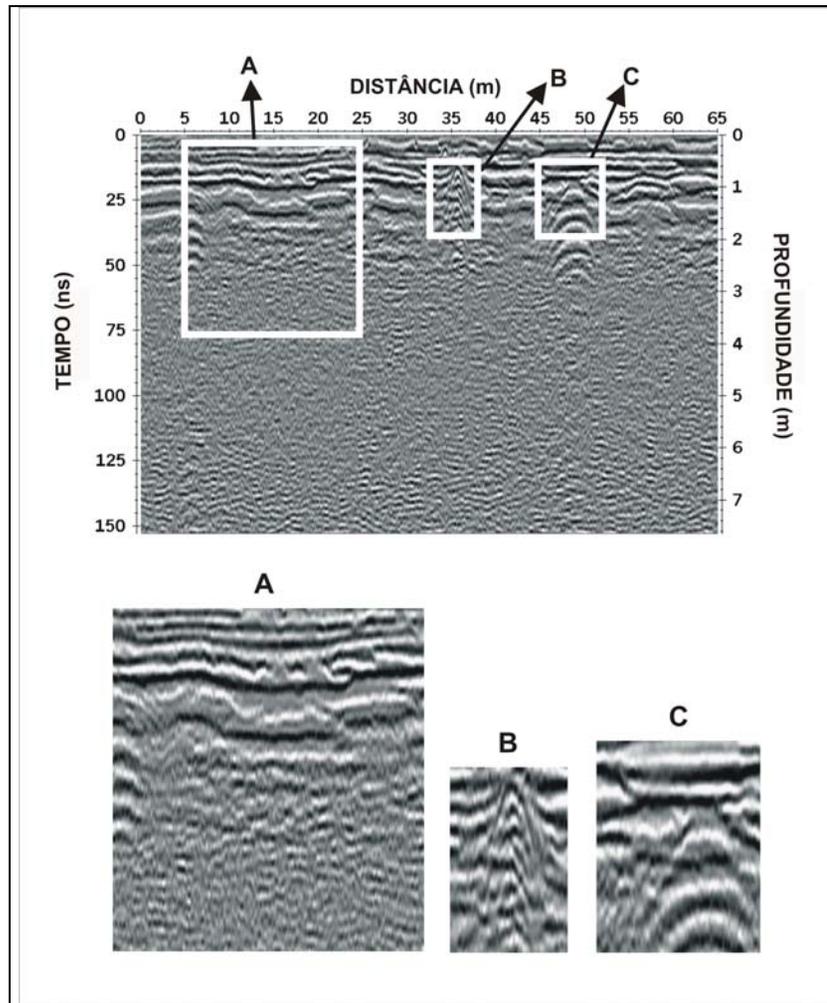


Figura 4 – Seção de GPR sem balanceamento espectral

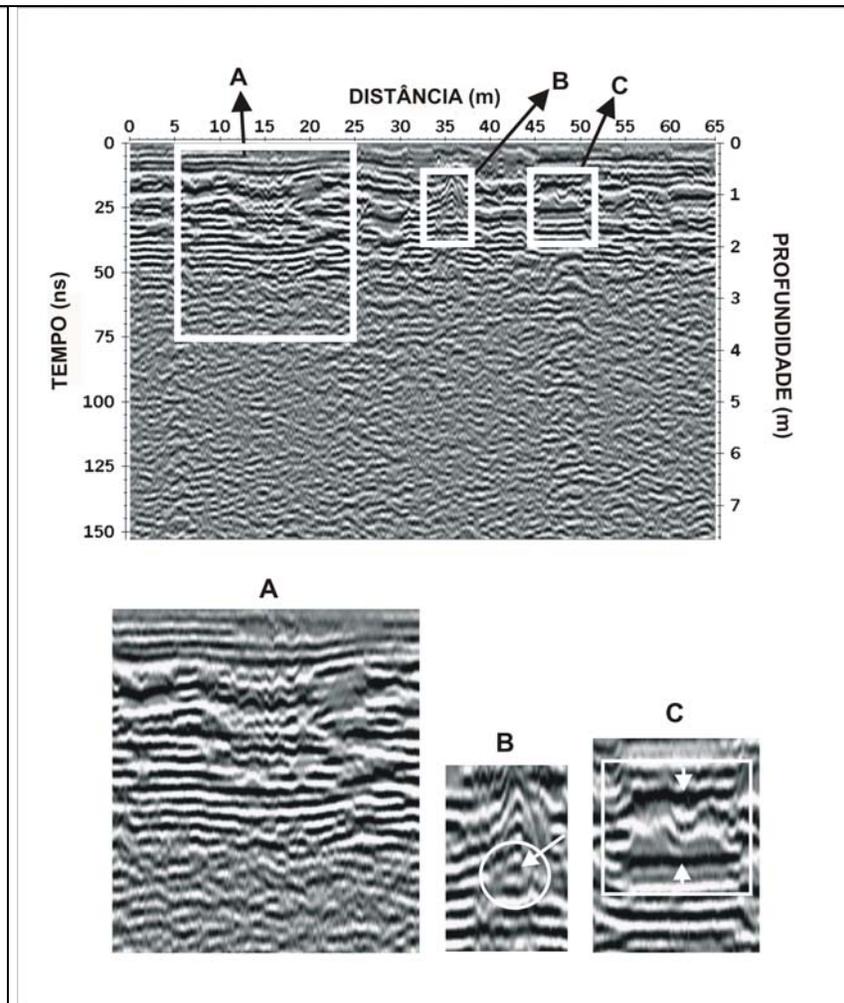


Figura 5 – Seção de GPR com balanceamento espectral

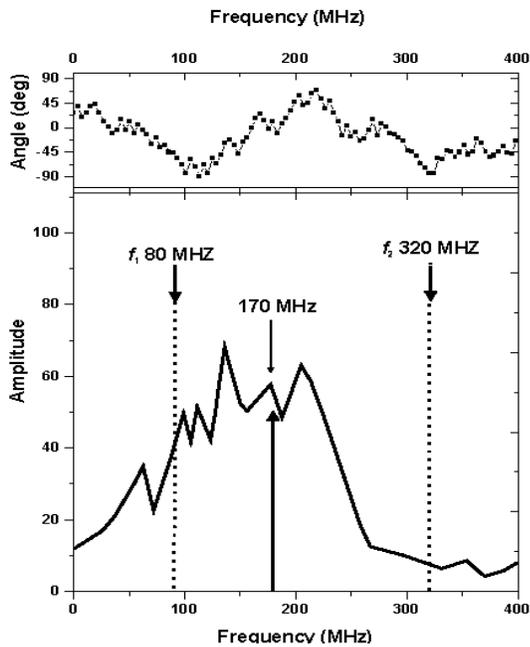


Figura 6 – espectro de amplitude da seção da figura 4, sem balanceamento espectral. O espectro está centralizado em torno de 170 MHz

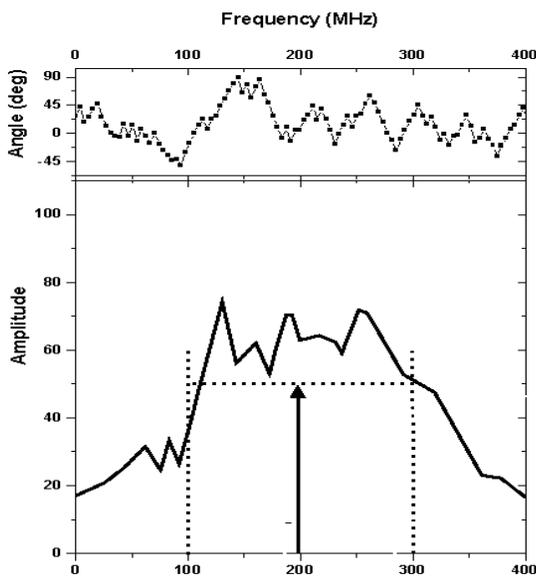


Figura 7 – espectro de amplitude da seção da figura 5, com balanceamento espectral. O espectro está centralizado em torno de 200 MHz.

Conclusões

A qualidade dos resultados do GPR é fortemente dependente da correção dos eventos de propagação que sempre estão presentes em qualquer ambiente geológico. A correção determinística desses efeitos

requer o conhecimento dos atributos da onda e do meio que só podem ser obtidos através de medidas *in situ* ou em laboratório, ou de modelamento matemático e geração de modelos sintéticos para comparação com dados reais, o que na prática do GPR normalmente não é feito.

Por outro lado é possível avaliar os efeitos dos fatores de propagação a partir da análise do espectro de amplitude e fase do sinal registrado, que é muito sensível a estes eventos. A partir do conhecimento dos parâmetros de aquisição, particularmente da frequência central da antena, um balanceamento espectral bem aplicado, em associação com a aplicação de SEC, pode repor simultaneamente a amplitude original do pulso e a centralização do espectro de potência em torno da frequência nominal de emissão, corrigindo, pelo menos em parte, os efeitos da atenuação.

Referências

- Annan, A. P. 1996. Transmission Dispersion and GPR. *JEEG*, v.0, Nº 2, p. 125-136.
- Bano, M. 1996. Constant dielectric losses of ground penetrating radar waves. *Geophysics J. Int.* 124 (1), 279-288.
- Hollender, F. and Tillard, S. 1998. Modeling ground-penetrating radar wave propagation and reflection with the Jonscher parameterization. *Geophysics*, vol 63, p. 1933-1942.
- Jol, H. M. 1995. Ground penetrating radar antennae frequencies and transmitter powers compared for penetration depth, resolution and reflection continuity. *Geophysical Prospecting*, Vol. 43, p. 693-709.
- Olhoeft, G. R. 1998. Electrical, magnetic, and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. In *Proceedings of GPR'98 Seventh Int'l. Conf. on Ground Penetrating Radar*, may 27-30, The University of Kansas, Lawrence, KS, USA, p. 177-182.
- Plumb, R. G., Noon, D. A., Longstaff, I. D., and Stickley, G. F. 1998. A waveform-range performance diagram for ground-penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 40, p. 117-126.
- Powers, M. H. 1997. Modeling Frequency-dependent GPR. *The Leading Edge*, November, p. 1657-1662.
- Sun, J and Young, R. A. 1995. Recognizing surface scattering in ground penetrating radar data. *Geophysics*, vol. 60, Nº 5, p. 1378-1385.
- Turner, G. and Siggins, A. F. 1994. Constant Q attenuation of subsurface radar pulses. *Geophysics*, vol. 59, Nº 8, p. 1192-1200.
- Yilmaz, O. 1987. *Seismic data processing*. Society of exploration Geophysicist, Investigation in Geophysics Nº 2, Tulsa, OK.
- Young, R. A. and Deng, Z. 1995. Interactive processing of GPR data. *The Leading Edge*, April, p.275-280.
- Young, R. A. and Sun, J. 1999. Revealing stratigraphy in ground-penetrating radar data using domain filtering. *Geophysics*, vol. 64, Nº 02, p. 435-442.
- Zeng, X., McMechan, G. A., Cai, J., and Chen, H. W., 1995. Comparison of ray and Fourier methods for modeling monostatic GPR profiles : *Geophysics*, 60, 1727-1734.