

DECONVOLUÇÃO PREDITIVA DE DADOS GPR ADQUIRIDOS SOBRE LÂMINA D'ÁGUA: EXEMPLO DO RIO TAQUARI, PANTANAL MATOGROSSENSE

Leandro Moutinho¹, Jorge Luís Porsani² e Milton José Porsani³

Recebido em 11 março, 2005 / Aceito em 29 julho, 2005
Received on March 11, 2005 / Accepted on July 29, 2005

ABSTRACT. This paper presents results obtained from the acquisition and processing of GPR (Ground Penetrating Radar) data recorded on the water surface of the Taquari River in the Pantanal wetland. This unconventional mode of use of the GPR method has shown to be quite viable and had allowed us to set some optimal parameters for GPR data acquisition on water surface, acting as a guiding tool for future GPR works in similar regions. The obtained GPR sections have allowed the clear identification of some physiographic structures of the riverbed, in addition to primary reflections and events corresponding to multiple reflections.

We have applied the Wiener-Levinson predictive deconvolution (PD) method to remove the multiple reflections present in the GPR sections. PD method has been successfully used in the petroleum industry for marine seismic data processing. PD in the mono and multichannel modes were applied on three GPR sections. The deconvolved sections have demonstrated that the attenuation of the multiple reflections in the radargrams has been more efficient in regions where no abrupt variations occur in the riverbed and the thickness of the water surface is greater than two meters.

Even though this work has a local feature, the promising results obtained with the Wiener-Levinson PD method, both mono and multichannel, suggest the employment of this methodology as an effective tool in the removal of multiple reflections present in GPR data acquired on the surface of rivers and lakes.

Keywords: GPR - Ground Penetrating Radar, Multiple reflections, Deconvolution predictive, Wiener-Levinson filters, Taquari River, Pantanal wetland.

RESUMO. Neste trabalho apresentamos resultados obtidos com a aquisição e o processamento de dados de radar de penetração no solo (GPR - *Ground Penetrating Radar*) registrados sobre as águas do Rio Taquari, na Planície do Pantanal Matogrossense. Esta modalidade não convencional de utilização do método GPR, demonstrou ser bastante viável e permitiu estabelecer alguns parâmetros ótimos para a aquisição de dados GPR sobre a lâmina d'água, podendo servir de guia para os futuros trabalhos de GPR em regiões similares. As seções obtidas permitiram identificar claramente algumas estruturas no leito do Rio Taquari, tais como bancos de areia e canais do rio, além de reflexões primárias e fortes eventos correspondentes a reflexões múltiplas.

Para remoção das reflexões múltiplas, presentes nas seções GPR, utilizamos o método de filtragem denominado deconvolução preditiva (DP) de Wiener-Levinson que possui seu uso consagrado na indústria do petróleo para processamento de dados sísmicos marítimos. A DP de Wiener-Levinson, nas modalidades mono e multicanal, foram aplicadas sobre três seções fluviais de dados GPR. As seções deconvolidas demonstraram que a atenuação das reflexões múltiplas nos radargramas foi mais eficaz em regiões onde não ocorrem variações abruptas no leito do rio e a espessura da lâmina d'água é superior a dois metros.

Embora este trabalho tenha sido de caráter local, os resultados promissores obtidos, com o método de DP de Wiener-Levinson, mono e multicanal, sugerem o emprego desta metodologia como uma ferramenta eficaz na remoção de reflexões múltiplas presentes em dados GPR adquiridos sobre a superfície de rios e lagos.

Palavras-chave: Radar de Penetração no Solo - GPR, Reflexões Múltiplas, Deconvolução Preditiva, Filtros de Wiener-Levinson, Rio Taquari, Pantanal Matogrossense.

¹ IAG-USP. Programa de Pós-Graduação em Geofísica. Rua do Matão, 1226 - 05508-090 Cidade Universitária, São Paulo, SP. Fone: (11) 3091-4734; Fax: (11) 3091 5034 - E-mail: lmout@bol.com.br

² IAG-USP. Departamento de Geofísica, Rua do Matão, 1226 - 05508-090 Cidade Universitária, São Paulo, SP. Fone: (11) 3091-4734; Fax: (11) 3091 5034 - E-mail: porsani@iag.usp.br

³ CPGG-UFBA. Instituto de Geociências, 40170-115 Campus Universitário de Ondina, Salvador, BA. Fone: (71) 3203-8530 - E-mail: porsani@cpgg.ufba.br

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O Pantanal Matogrossense está localizado na região Centro-Oeste do Brasil nos Estados de Mato Grosso do Sul e Mato Grosso, e em pequenas porções na Bolívia e no Paraguai, tendo uma área total de aproximadamente 140.000 km² (Figura 1). Ele é circundado por planaltos, onde a elevação pode variar entre 200 m a mais de 800 m, enquanto as planícies pantaneiras recebem água e sedimentos transportados das terras altas por diversos sistemas de drenagens, sendo considerado o maior complexo de terras alagadiças do mundo (Collischonn et al., 2001, EMBRAPA, 2003).

O Pantanal é uma Bacia Sedimentar Cenozóica cuja origem é atribuída à orogenia Andina (Ussami et al., 1999). A área de maior subsidência está situada na margem esquerda da parte superior do Rio Paraguai, na qual está fluindo para sul e trunca os rios de vários leques aluviais. Dentre eles, o leque aluvial do Rio Taquari é o que melhor representa as principais feições geomorfológicas e os processos sedimentares da planície pantaneira (Souza, 1998) e compreende uma área de cerca de 50.000 km², ou cerca de 37% da área total do Pantanal (Assine & Soares, 2004).

Embora navegável até a década de 70, o Rio Taquari tem sido rapidamente assoreado, causando problemas de navegabilidade. Segundo Souza (1998), o aumento na taxa de deposição de sedimentos é causado pelo uso inadequado das terras nas regiões dos planaltos adjacentes ao Pantanal. Godoy et al. (1998), com base em estudos geocronológicos com ²¹⁰Pb, verificaram que o aumento na deposição de sedimentos está relacionado com as mudanças climáticas e a expansão da atividade agropecuária nas regiões dos planaltos.

Devido a agradação do canal do Rio Taquari, muitos pontos de "crevasse" têm aparecido em diques naturais durante os últimos 25 anos, iniciando os processos de avulsões (Souza et al., 2002a; Assine, 2005; Porsani et al., 2004, 2005). As avulsões são os arrombamentos das margens do rio, e como consequência, tem mudado drasticamente o seu curso através do aparecimento de novos canais distributários, causando inundações em lugares onde antes não inundavam (Figura 2). Estes eventos interferem na atividade pecuária, principal atividade sócio-econômica do Pantanal, e tem sido a causa de grandes preocupações entre os políticos locais e os fazendeiros, que estão clamando por emergência visando à restauração dos diques naturais e na dragagem do canal do rio. Entretanto, mais informações a respeito do sistema do rio e um melhor entendimento de sua dinâmica são fundamentais antes da intervenção do homem na natureza. Neste sentido, foram

realizados vários levantamentos geofísicos utilizando o método de radar de penetração no solo (GPR - *Ground Penetrating Radar*) ao longo do Rio Taquari, visando subsidiar os estudos multidisciplinares da sub-componente Bacia do Taquari do Programa Pantanal (Araújo et al., 1999). Os resultados preliminares destes estudos estão publicados em Souza et al. (2002b); Moutinho (2003); Moutinho et al. (2003).

O processamento dos dados GPR revelou a existência de refletores com características de reflexões múltiplas. A reflexão múltipla é um tipo indesejado de interferência de ondas, na qual a energia eletromagnética (ou sísmica) é refletida diversas vezes entre o topo e a base de uma mesma camada, ou diversas camadas, antes de ser registrada (Figura 3). Normalmente, as seções GPR adquiridas sobre lâmina d'água apresentam estas feições que ocorrem pela presença da camada de água que funciona como um guia de ondas, aprisionando a energia eletromagnética entre interfaces com grandes contrastes de condutividade elétrica e de permissividade dielétrica (ar-água, água-sedimentos). A reverberação das ondas eletromagnéticas entre topo e base da camada de água é muito proeminente por causa desses contrastes. A presença deste tipo de evento na seção GPR (ou sísmica) pode dificultar, ou até impossibilitar a identificação das reflexões primárias que possam estar relacionadas com as feições geológicas. Desta forma, as reflexões múltiplas criam dificuldades para a interpretação das seções e, por conseguinte, devem ser eliminadas.

No presente trabalho utilizamos o método de deconvolução preditiva (DP) de Wiener-Levinson, que possui emprego consagrado na indústria do petróleo, para a remoção das reflexões múltiplas presentes nos dados GPR adquiridos no Rio Taquari, Bacia do Pantanal Matogrossense. A DP de Wiener-Levinson é normalmente empregada no processamento de dados sísmicos com o objetivo de comprimir o pulso sísmico ou predizer e "suprimir" reflexões múltiplas. O bom funcionamento do método, quando aplicado para atenuação das reflexões múltiplas, depende basicamente do caráter periódico daqueles eventos. Outro problema do método de DP ocorre quando reflexões múltiplas estão superpostas às reflexões primárias. Neste caso, também as reflexões primárias podem ser suprimidas ou atenuadas.

Uma interpretação, análise e discussão dos resultados das seções GPR, em termos das estruturas sedimentares abaixo da base do Rio Taquari, de sua dinâmica, e do fenômeno das avulsões, que afetam a planície pantaneira, podem ser encontrados em Porsani et al. (2004, 2005).

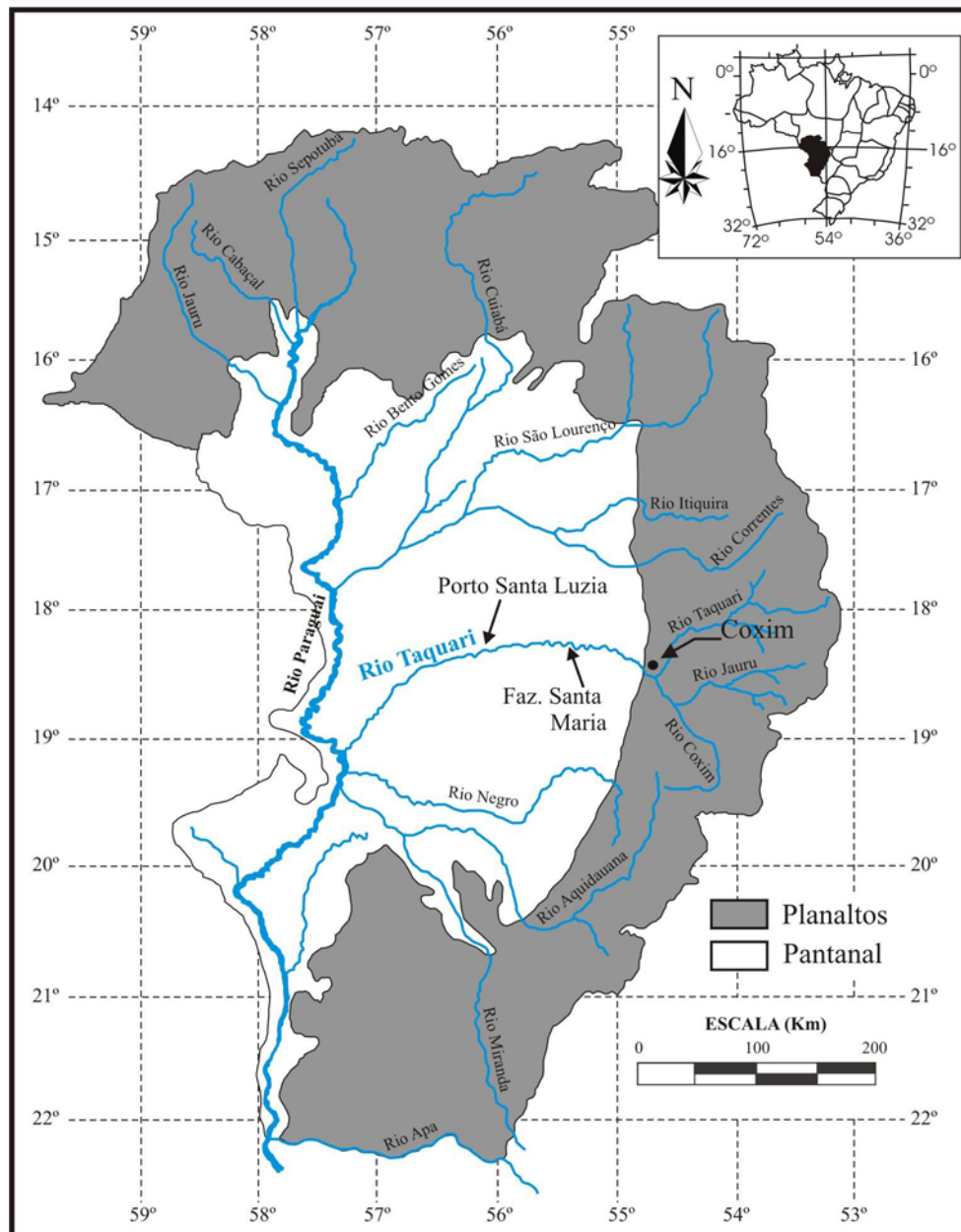


Figura 1 – Mapa de localização do Pantanal Matogrossense (modificado de Souza, 1998).

AQUISIÇÃO DOS DADOS GPR NO RIO TAQUARI

Para testar a viabilidade e a eficiência do método GPR em estudos de processos geomorfológicos e sedimentares no Leque Aluvial do Rio Taquari, foram adquiridas seções de reflexão GPR em três áreas ao longo do curso do rio. As seções foram realizadas nas direções transversal e longitudinal em relação ao leito do rio, utilizando-se antenas de 100 e 200 MHz (espaçadas de 1 metro) e de 50 MHz (espaçadas de 2 metros).

Para a aquisição dos dados foi utilizado o equipamento suco Ramac/Mala do Departamento de Geofísica do IAG/USP. As antenas e seus módulos eletrônicos foram condicionados no interior de catamarãs, orientados longitudinalmente à direção da aquisição. Os catamarãs foram projetados e desenvolvidos pelos pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), especificamente para o uso do GPR sobre lâmina d'água. Todo o equipamento e acessórios, incluindo a uni-

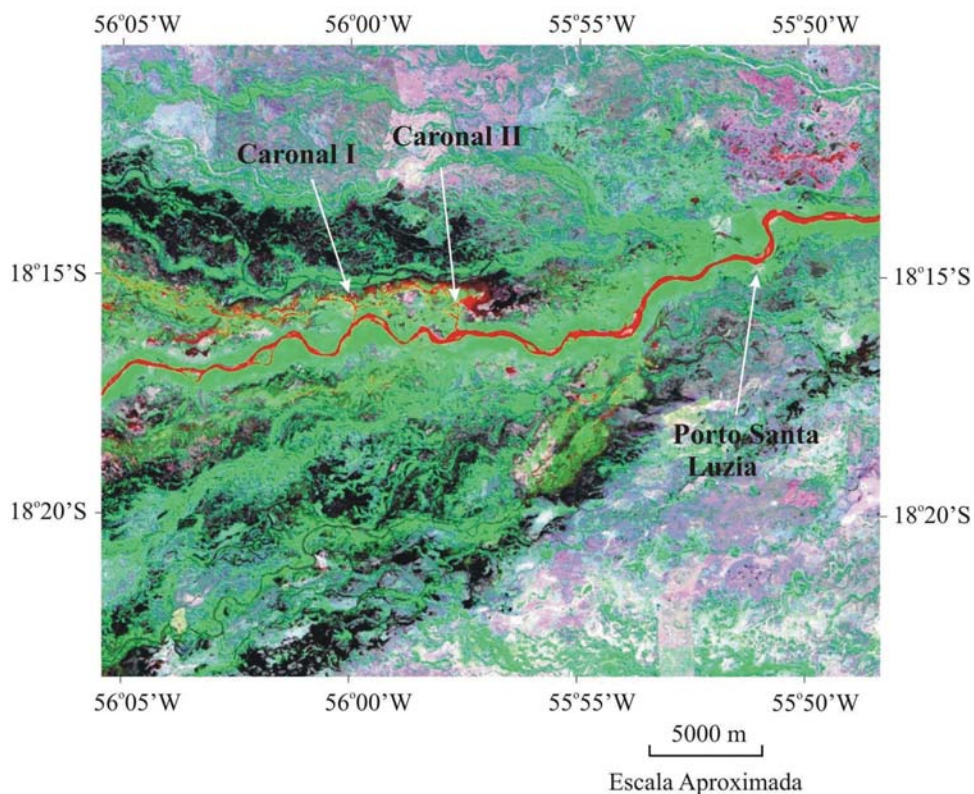


Figura 2 – Imagem de satélite (Landsat 7) da região onde estão ocorrendo as avulsões (EMBRAPA, 2003).

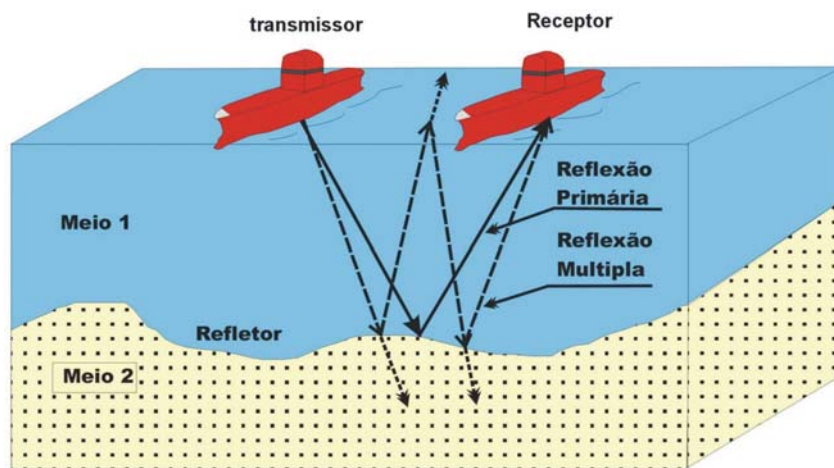


Figura 3 – Esquema da geração das reflexões múltiplas.

dade de controle do GPR, o *laptop* e o sistema de posicionamento global (GPS - Global Positioning System), utilizado para demarcar o posicionamento espacial das seções, foram arranjados no interior de uma pequena embarcação de alumínio (Figura 4), e as antenas e seus módulos eletrônicos foram colocados no interior

dos catamarãs dispostos paralelos ao barco (Figura 5).

Considerando a inexistência de trabalhos similares no Rio Taquari, e com o propósito de testar o desempenho do método GPR sobre lâmina d'água e melhorar a razão sinal/ruído (Versteeg, 1996), antes do início da campanha testamos vários parâmetros



Figura 4 – Equipamento GPR arranjado numa embarcação de alumínio, o sistema GPS e os catamarãs com as antenas.



Figura 5 – Catamarãs com as antenas de 100 MHz durante a aquisição de uma seção GPR ao longo do Rio Taquari.

de campo. Os parâmetros ótimos encontrados para aquisição dos dados sobre as águas do Rio Taquari foram:

- Amostragem temporal de 0,5 s. Este valor foi escolhido devido à velocidade média do barco ser de 4 km/h (1,1 m/s), o que resulta num intervalo entre cada traço de aproximadamente 0,5 m. Entretanto, segundo os dados de GPS, a velocidade do barco variou entre 2 e 6 km/h, dependendo da intensidade das correntes no rio. Neste caso, o espaçamento entre cada traço variou de aproximadamente 0,3 a 0,8 m;
- As seções longitudinais ao rio foram adquiridas no sentido contrário ao fluxo de água. Este procedimento permitiu uma maior densidade de traços devido a menor velocidade da embarcação e maior estabilidade das antenas (Figura 5);
- O valor ótimo de empilhamento foi de 32 traços, resultando na melhor razão sinal/ruído.

As águas do Rio Taquari apresentam baixa condutividade elétrica, i.e., 16,5 mS/m, e para a conversão tempo-profundidade foi utilizada a velocidade de 0,03 m/ns correspondente à velocidade da onda eletromagnética na água (Daniels, 1996). As informações detalhadas sobre os parâmetros ótimos obtidos durante a aquisição das seções GPR no Rio Taquari podem ser encontradas em Moutinho (2003).

PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento dos dados GPR adquiridos ao longo do Rio Taquari foi realizado em duas etapas. Na primeira etapa, visando realçar as estruturas de interesse, foi aplicado um processamento básico de filtrações e ganhos nos radargramas, utilizando-se o *software* Gradix (Interpex). Numa segunda etapa, visando a remoção das reflexões múltiplas presentes nos dados **GPR**, utilizamos subrotinas Fortran para aplicação da **DP** de Wiener-Levinson juntamente com o aplicativo Seismic Unix (SU) que é um *software* aberto e de distribuição gratuita. O **SU**, conforme é denominado, foi desenvolvido e é mantido pelo *Center of Wave Phenomena (CWP) da Colorado School of Mines* (www.cwp.mines.edu/cwpcodes). O detalhamento das etapas envolvidas no processamento dos dados está sequenciado no fluxograma apresentado na Figura 6.

A seguir apresentamos um resumo da fundamentação teórica do método de DP mono e multicanal de Wiener-Levinson e ilustramos através de um exemplo sintético as situações onde o método pode falhar.

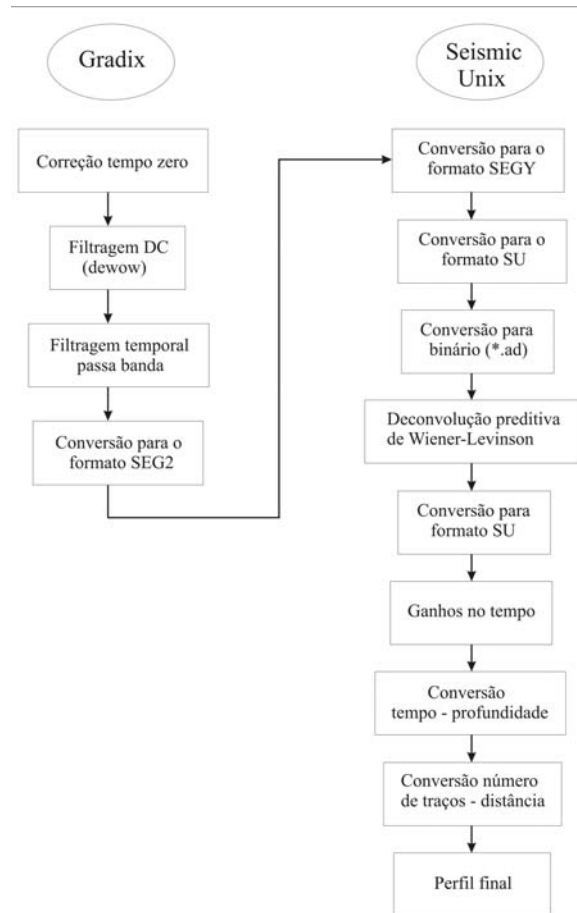


Figura 6 – Fluxograma usado no processamento dos dados.

DECONVOLUÇÃO DAS REFLEXÕES MÚLTIPLAS

O modelo convolucional de um radargrama sem ruídos e com múltiplas pode ser matematicamente descrito pela equação:

$$x_t = p_t * e_t * m_t$$

em que:

x_t – é o radargrama registrado – traço de radar;

p_t – é o pulso eletromagnético (considerado invariante no tempo);

e_t – é a resposta impulsiva da terra ou função refletividade;

m_t – representa o trem de reverberação associado à onda eletromagnética na lâmina d'água;

* – representa o operador convolução.

Procura-se obter um operador h_t que, mediante convolução com o radargrama, consiga suprimir o trem de múltiplas m_t , ou seja, $h_t * x_t = p_t * e_t$, representando o radargrama sem

múltiplas. Tais filtros são obtidos com base no método dos mínimos quadrados (Robinson, 1966; Robinson & Treitel, 1980; Yilmaz, 1987). Este método é conhecido como método de DP de Wiener-Levinson, muito utilizado no processamento de dados sísmicos. Os filtros de Wiener-Levinson estimam e removem reflexões periódicas e podem, portanto, ser utilizados na filtragem de reflexões múltiplas dos traços sísmicos ou dos radargramas.

Neste trabalho, foram utilizados os filtros de DP de Wiener-Levinson monocanal e multicanal. Os filtros multicanais correspondem a operadores bidimensionais que implicitamente consideram a coerência lateral dos eventos presentes em traços vizinhos. O operador preditivo multicanal age sobre vários traços sísmicos simultaneamente fazendo com que o método atue de forma mais eficaz (Lima & Porsani, 2001). A construção do filtro multicanal utiliza coeficientes das funções autocorrelação e correlação-cruzada dos canais de entrada. O tempo requerido na DP multicanal é diretamente proporcional ao número de canais utilizados. Aumentando-se o número de canais aumenta-se proporcionalmente a robustez deste processo, entretanto, segundo Lima (1999), a partir de 7 canais a DP multicanal de Wiener-Levinson torna-se instável.

A teoria matemática utilizada na obtenção dos filtros digitais multicanais é análoga aos filtros monocanais. Matematicamente, este filtro representa a extensão da álgebra escalar para a álgebra matricial, ou seja, a teoria multicanal pode ser obtida da teoria monocanal pela apropriada substituição de escalares por matrizes. A discussão detalhada da teoria matemática envolvida na deconvolução multicanal pode ser encontrada na literatura (Robinson, 1966; Davies & Mercado, 1968; Lima, 1999; Lima & Porsani, 2001).

OBTENÇÃO DOS FILTROS WIENER-LEVINSON MULTICANAIS

A formulação matemática básica utilizada na obtenção dos filtros de Wiener-Levinson multicanais é apresentada a seguir. Considerando-se o caso de dois canais, $\{x_t\}$ e $\{y_t\}$ e um filtro de 3 coeficientes (ncf=3) em cada canal $\{a_1, a_2, a_3\}$ e $\{b_1, b_2, b_3\}$, respectivamente, podemos prever o sinal desejado \tilde{z}_t através da expressão,

$$\tilde{z}_t = \sum_{k=1}^3 x_{t-k} + 1ak + \sum_{k=1}^3 y_{t-k} + 1bk. \quad (1)$$

ou, utilizando-se notação matricial,

$$\begin{pmatrix} \tilde{z}_0 \\ \tilde{z}_1 \\ \tilde{z}_2 \\ \vdots \\ \tilde{z}_m \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 & y_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & y_1 & x_0 & y_0 & 0 & 0 \\ x_2 & y_2 & x_1 & y_1 & x_0 & y_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & y_m & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & x_m & y_m & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_m & y_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ a_2 \\ b_2 \\ a_3 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

A expressão para os desvios entre valores observados Z_j e calculados \tilde{Z}_j pode ser representada na forma matricial como segue:

$$e = z - W_0h_0 - W_1h_1 - W_2h_2 \quad (3)$$

onde $h_j = (a_j, b_j)^T$. O superscrito T representa a transposta. W_j representa a matriz formada pelas colunas $j + 1$ e $j + 2$ da matriz da forma linear, representada pela equação (2). Minimizando a forma quadrática $Q(h) = e^T e$ com relação aos parâmetros $\{a_j, b_j\}$ obtém-se o sistema de equações normais,

$$\begin{pmatrix} R_0 & R_{-1} & R_{-2} \\ R_1 & R_0 & R_{-1} \\ R_2 & R_1 & R_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_0^T z \\ W_1^T z \\ W_2^T z \end{pmatrix} \quad (4)$$

onde,

$$\begin{aligned} R_0 &= W_j^T W_j & j &= 0, 1, 2 \\ R_1 &= W_j^T W_{j+1} & j &= 0, 1 \\ R_2 &= W_j^T W_{j+2} & j &= 0 \\ R_{-j} &= R_j^T & j &= 0, 1, 2 \end{aligned}$$

A matriz dos coeficientes na equação (4) possui estrutura bandeada Toeplitz formada por blocos de matrizes. A solução do sistema pode ser obtida com a recursão de Levinson multicanal (Lima, 1999). Ao invés de escalares, temos blocos de matrizes quadradas de dimensões $Nc \times Nc$ onde Nc representa o número de canais, ou seja, traços (radargramas) escolhidos para a geração do filtro. Deixando o sinal desejado corresponder a um dos canais de entrada, avançado de L amostras, $z_t = x_{t+L}$, teremos, através da solução da equação (4), os coeficientes do operador preditivo multicanal com distância de predição L . Se o número de canais for apenas um, o método reduz-se ao método convencional de Wiener-Levinson para DP monocanal. Deixando $L = 1$, teremos os coeficientes do operador de predição unitária, relacionado com o filtro inverso de WL utilizado na deconvolução do pulso sísmico ou, se desejarmos, do pulso de radar.

LIMITAÇÕES DA DECONVOLUÇÃO PREDITIVA

Com o objetivo de ilustrar as limitações do método de DP para remoção/atenuação de reflexões múltiplas, geramos uma família de 24 traços sísmicos sintéticos, contendo reflexões múltiplas e primárias. Os sismogramas foram gerados com base no modelo de duas camadas planas e horizontais, utilizando-se afastamento fonte-receptor crescente. Nessa situação, a família de traços exibe reflexões múltiplas, associadas à reverberação da energia no interior da primeira camada, e duas reflexões primárias (tempos de 0.9s e 2.0s), conforme ilustrado na Figura 7a. Note que a primeira reflexão múltipla (tempo de 1.8s) interfere com a segunda reflexão primária.

Os resultados das DPs, mono e multicanal, aplicadas sobre os dados da Figura 7a, estão apresentados nas Figuras 7b, 7c e 7d. O resultado da DP monocanal está mostrado em (7b). Os resultados das DPs multicanal, utilizando-se 3 e 5 canais estão apresentados em (7c) e (7d), respectivamente. Notamos que utilizando 5 canais o método é bastante efetivo, principalmente nos sismogramas onde a distância fonte-receptor é menor, ou seja onde a periodicidade das múltiplas é razoavelmente mantida. Como era de se esperar, nos canais mais afastados o filtro não atuou de maneira satisfatória e ainda atenuou consideravelmente a primária da interface 2, na porção onde a múltipla se superpunha à reflexão primária. Pode-se notar ainda que, utilizando um maior número de canais, a reflexão primária da interface 2 não é replicada, o que normalmente ocorre com a utilização da deconvolução monocanal, conforme pode-se verificar em (7b). Este resultado benéfico, da DP multicanal, é consequência da interferência destrutiva proporcionado pela filtragem multicanal, que gera o traço filtrado como soma de vários traços simultaneamente deconvolvidos, conforme descreve a teoria do método de DP multicanal (equação 1).

RESULTADOS DA FILTRAGEM MONOCANAL

Para testar o desempenho do filtro foi utilizada uma seção GPR de 100 MHz adquirida num canal abandonado do rio, denominado de "Baia do Deda", localizado próximo da cidade de Coxim (Figura 1). A Figura 8 mostra esta seção processada sem a deconvolução.

A Figura 9a mostra o resultado obtido com a aplicação da DP monocanal sobre os dados da Figura 8. Nesta seção, observa-se a quase supressão da primeira reflexão múltipla. Entretanto, uma segunda reflexão múltipla, entre as posições 250 e 280 metros, permanece inalterada devido a sua periodicidade ser diferente da primeira múltipla já atenuada. Para eliminar este segundo evento

o resultado obtido com a primeira deconvolução foi novamente deconvolvido, alterando-se os parâmetros do filtro. A Figura 9b mostra o resultado obtido após a segunda etapa da DP monocanal, tendo agora como entrada os dados da Figura 9a. Observa-se agora que a segunda reflexão múltipla foi quase completamente atenuada.

A análise preliminar das seções GPR adquiridas ao longo do Rio Taquari atesta a grande irregularidade de seu leito, sendo que a espessura da lâmina d'água varia de centímetros nas proximidades dos bancos de areia, a alguns metros na região das avulsões (Souza et al., 2002b; Moutinho et al., 2003; Porsani et al., 2004, 2005). Por este motivo, para que a remoção das múltiplas seja eficaz é necessário utilizar diferentes parâmetros de filtragem numa mesma seção. Para atender esta necessidade o algoritmo proposto por (Porsani & Vetter, 1984) foi modificado para que a filtragem pudesse ser realizada "por partes" da seção. Desta maneira, numa mesma seção podem ser realizadas várias filtragens inversas com diferentes parâmetros (número de coeficientes do filtro e distância de predição) conforme as diferentes espessuras da lâmina d'água de cada região.

A Figura 10a mostra o resultado da DP monocanal "por partes" da Figura 8. Os resultados com este novo procedimento foram melhores que os obtidos anteriormente, suprimindo as múltiplas. É interessante notar que mesmo a múltipla entre as posições 150 e 175 metros sob o banco de areia foi visivelmente atenuada. Outro ponto a ser ressaltado é que as feições não relacionadas com as reverberações foram preservadas, pois o filtro utilizado permite uma escolha aprimorada do número de coeficientes e distância de predição, agindo somente na região da reflexão múltipla.

RESULTADOS DA FILTRAGEM MULTICANAL

A deconvolução com o algoritmo multicanal "por partes" foi utilizada seguindo os mesmos princípios já empregados com o algoritmo monocanal "por partes", ou seja, os parâmetros de entrada do filtro são escolhidos conforme a região da seção que se deseja deconvolver. Para as seções adquiridas ao longo do Rio Taquari foi utilizado o valor ótimo de 5 canais o qual apresentou melhor compromisso entre tempo de processamento e a robustez da filtragem.

A Figura 10b mostra o resultado da DP multicanal "por partes" para a seção GPR de 100 MHz, representada na Figura 8. Nota-se que a ação deste filtro foi muito eficiente na remoção das reflexões múltiplas, sendo sutilmente melhores que os obtidos com o procedimento monocanal "por partes" (Figura 10a), prin-

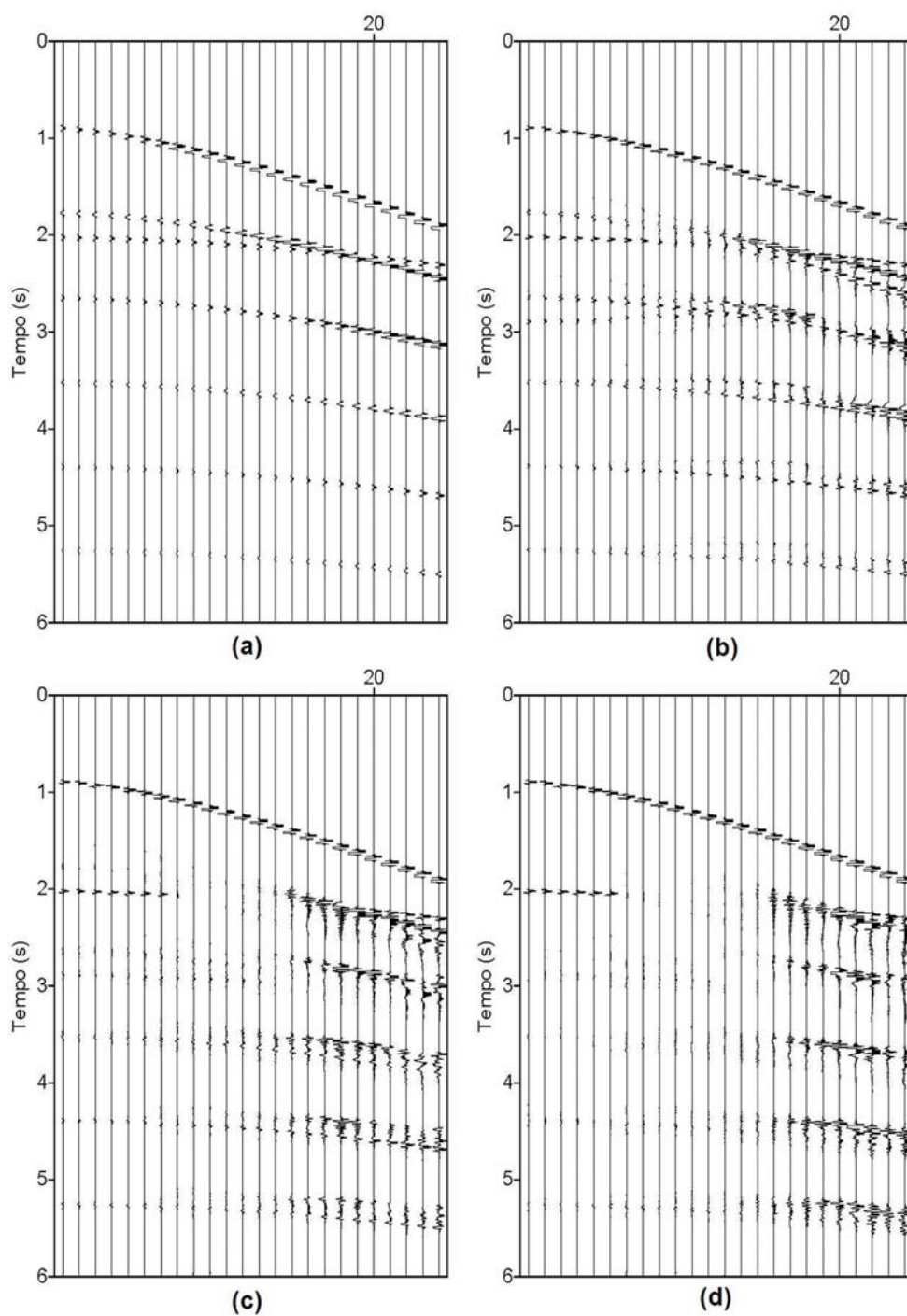


Figura 7 – Sismogramas sintéticos sem DP em (a). Sismogramas após a deconvolução monocanal em (b). Sismogramas após a deconvolução multicanal utilizando 3 canais em (c) e 5 canais em (d).

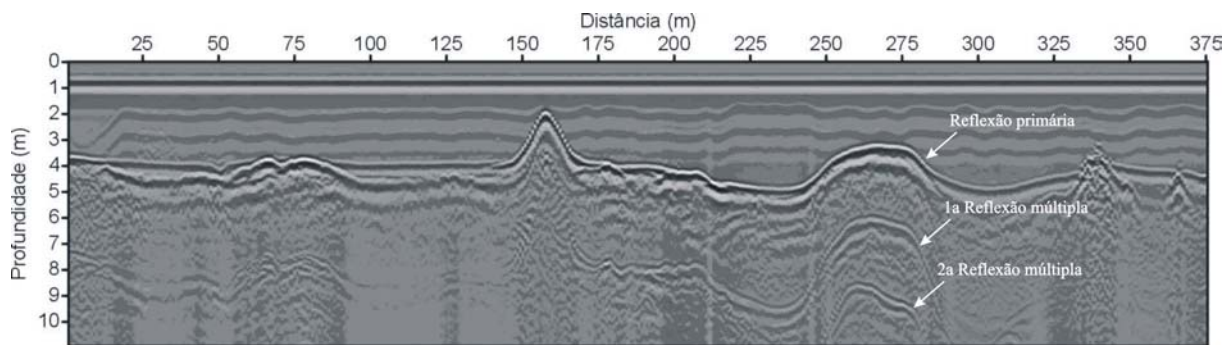


Figura 8 – Seção GPR de 100 MHz adquirida num canal abandonado do rio (sem a deconvolução das múltiplas).

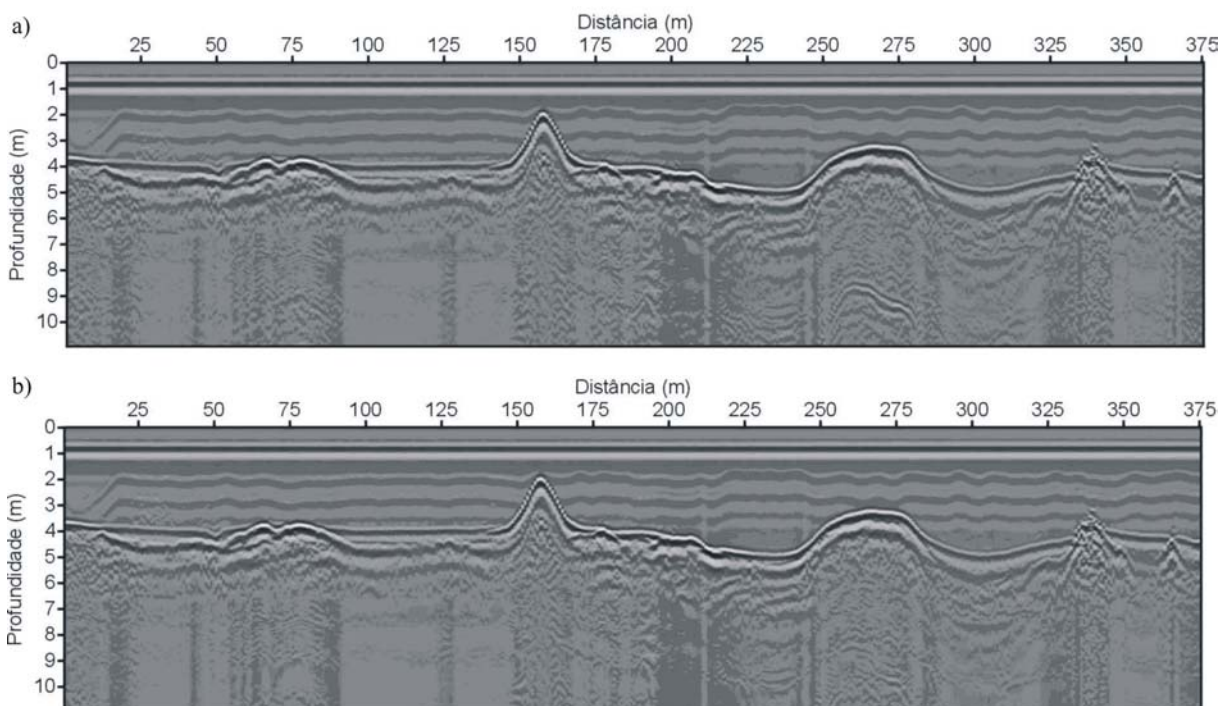


Figura 9 – Seção GPR ilustrando a atenuação das reflexões múltiplas com a DP monocanal aplicada sobre os dados da Figura 8. O resultado da DP monocanal é mostrado em a), e o resultado da DP monocanal, subsequente, tendo como entrada os resultados em a), é mostrado em b).

principalmente pela maior estabilidade deste filtro, minimizando as reverberações remanescentes e por não introduzir novas feições aos dados. Além disso, em regiões com inclinação abrupta do refletor primário o filtro multicanal mostrou-se mais eficiente na remoção das reflexões múltiplas.

A Figura 11 mostra outro resultado da deconvolução multicanal “por partes” comparado com a seção processada sem deconvolução. Esta seção foi adquirida com as antenas de 100 MHz no sentido transversal ao Rio Taquari e está localizada nas proximidades da Fazenda Santa Maria (Figura 1). Nesta seção

são observados dois bancos de areia no leito do Rio Taquari, o primeiro entre as posições 75 e 100 metros e o segundo, entre 190 e 220 metros. Além disso, nas porções, inicial, final e entre os bancos de areia, são observados os canais do rio aonde a espessura da lâmina d’água chega a 6 metros.

A filtragem multicanal “por partes” foi aplicada em toda a seção, com exceção da região do banco de areia entre 190 e 220 metros devido à grande quantidade de refletores múltiplos e discordantes. Nesta seção, a DP multicanal eliminou quase totalmente os efeitos das reflexões múltiplas, conforme pode ser

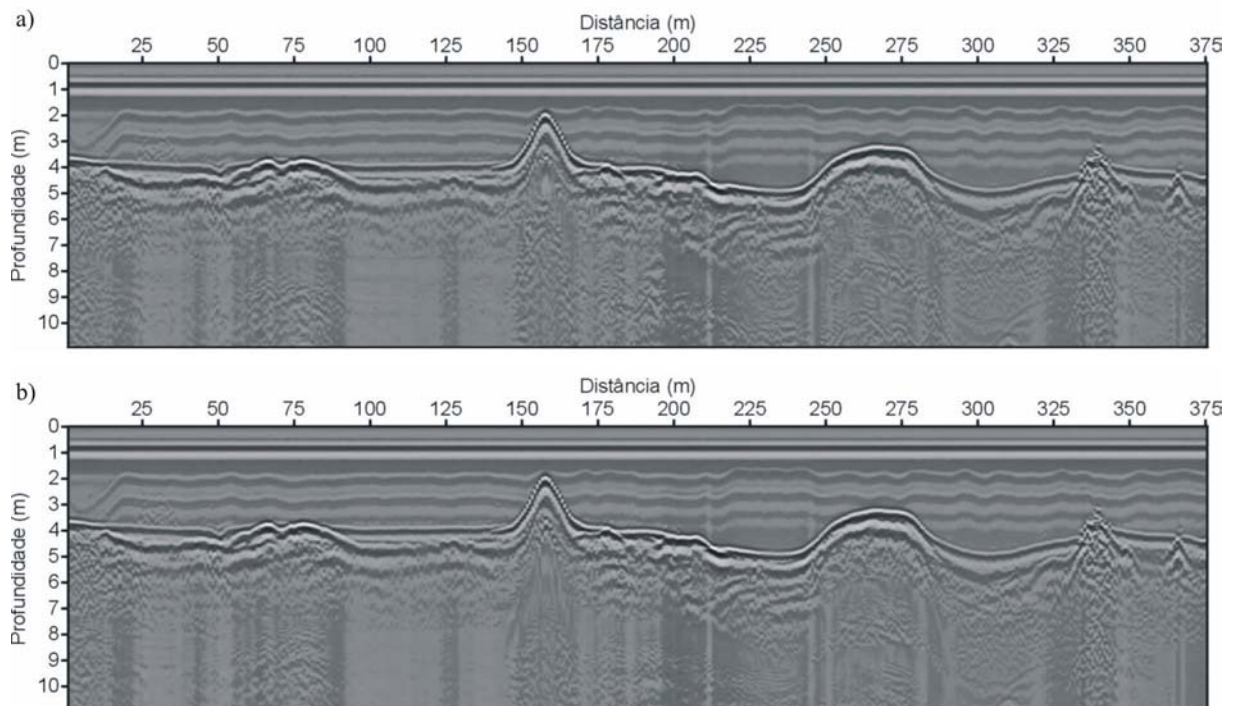


Figura 10 – Resultados das DP monocanal e multicanal, aplicada “por partes”, da seção apresentada na Figura 8. Resultado após a DP monocanal é mostrado em a) e após a DP multicanal em b).

observado na porção central da seção, entre as posições 100 m e 190 m, onde a maior espessura da lâmina d’água permite uma melhor distinção entre as reflexões primárias e a múltipla.

A Figura 12 mostra mais um resultado da DP multicanal “por partes” comparado com a seção processada sem deconvolução. Esta seção foi adquirida com as antenas de 100 MHz nas proximidades do Porto Santa Luzia, local onde estão ocorrendo as avulsões do Rio Taquari (Figuras 1 e 2). A seção inicia-se no canal principal do rio entre as posições 0 e 140 metros e a partir deste ponto, até o final, os dados são registrados dentro do novo canal distributário. É importante ressaltar que a espessura da lâmina d’água dentro do canal é maior que no leito do rio. A deconvolução desta seção foi efetiva em quase toda sua extensão. Apenas na região inicial da seção, onde a lâmina d’água apresenta menor espessura e o período das múltiplas é menor, observam-se reverberações remanescentes destas reflexões.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Embora as antenas de 50, 100 e 200 MHz tivessem sido usadas, neste trabalho são mostradas somente as seções de 100 MHz, pois elas combinam os melhores resultados em termos de resolução e penetração. O procedimento para a atenuação das

reflexões múltiplas dos dados GPR adquiridos no Rio Taquari, utilizando a DP monocanal foi efetivo, tendo eliminado quase totalmente as reflexões múltiplas. Entretanto, as irregularidades no leito do rio não permitiram a total eficiência do método quando aplicado ao longo de toda a extensão da seção.

O algoritmo para aplicação da DP monocanal foi modificado, de modo a permitir a escolha dos traços para a aplicação do filtro, ou seja, o filtro monocanal poderia ser aplicado “por partes”, ou seja, trechos, da seção. Este procedimento apresentou melhores resultados que o procedimento utilizado anteriormente, pois permitiu a remoção efetiva das reflexões múltiplas, através da utilização de diferentes parâmetros de filtragem (distância de predição, L , e número de coeficientes, ncf), apropriados às regiões distintas da seção.

O procedimento de eliminação das reflexões múltiplas das seções GPR utilizando a DP multicanal foi aplicado de maneira similar à DP monocanal “por partes”, ou seja, o usuário escolhe o trecho da seção onde o filtro será aplicado. Os resultados obtidos com este procedimento se revelaram muito bons, sendo mais eficazes que aqueles obtidos com o algoritmo monocanal “por partes”, devido a sua maior estabilidade em regiões com variações abruptas no fundo do leito do rio. Por outro lado, o tempo re-

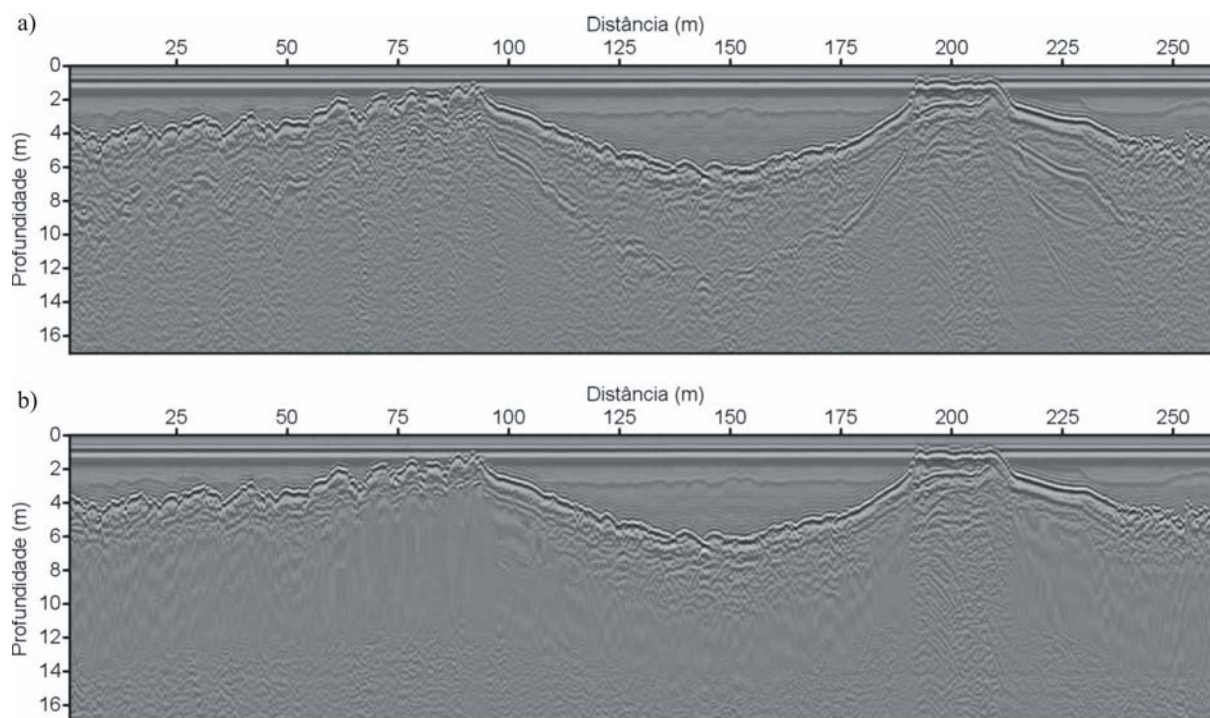


Figura 11 – Seção GPR de 100 MHz adquirida no sentido transversal ao Rio Taquari, localizada nas proximidades da Fazenda Santa Maria. Seção processada sem a deconvolução em a), e seção obtida após a DP multicanal “por partes” em b).

querido na DP multicanal é cerca de três vezes maior que aquele necessário para a DP monocanal “por partes”.

De maneira geral, os filtros deconvolutivos mostraram-se mais eficientes em regiões onde a lâmina d’água possui espessura aproximadamente constante e profundidade superior a 2 metros. Nos locais onde a espessura da lâmina d’água é inferior a 2 m o período de reverberação das reflexões múltiplas diminui ao ponto destas se sobreporem, prejudicando a eficiência da filtragem.

CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou que espessura da lâmina d’água, com mais de 7 m nas áreas investigadas, não foi obstáculo para a propagação do sinal eletromagnético do GPR, sendo este um procedimento perfeitamente viável. A boa penetração do sinal GPR foi possível devido à baixa condutividade da água do Rio Taquari, i.e., 16,5 mS/m.

Os testes de campo realizados para aplicação do método GPR no Rio Taquari, na Planície do Pantanal Matogrossense, permitiram estabelecer alguns parâmetros ótimos para a aquisição de dados GPR sobre a lâmina d’água nesta região, tais como: i) o intervalo de amostragem temporal de 0,5 segundos, ii) as seções longitudinais ao rio apresentam melhores resultados quando ad-

quiridas no sentido contrário ao fluxo de água e iii) empilhamento ou “stack” de 32 dos traços. Estes parâmetros podem servir de guia para os futuros trabalhos de aquisição de dados GPR sob lâmina d’água em situações similares.

O emprego do método de filtragem, conhecido como deconvolução preditiva de Wiener-Levinson, sobre os dados GPR, foi eficiente removendo ou atenuando as reflexões múltiplas presentes nos radargramas. Os melhores resultados foram obtidos com o filtro multicanal “por partes”, seguido dos filtros monocanal “por partes” e monocanal ao longo de toda a seção. Este fato deve-se à maior estabilidade e robustez do filtro multicanal que opera com diversos traços da seção simultaneamente, tirando vantagem da redundância de informação entre os traços vizinhos. A grande desvantagem da filtragem multicanal é que o tempo requerido para o processamento é em média três vezes maior que o requerido na filtragem monocanal, devido à maior complexidade do algoritmo e do número de canais utilizados.

As filtrações através da DP mono ou multicanal mostraram-se mais eficazes em regiões onde não ocorrem variações abruptas no fundo do leito do rio e a espessura da lâmina d’água é superior a 2 metros. Embora este trabalho tenha sido de caráter local, os resultados promissores, obtidos com a aplicação do método de

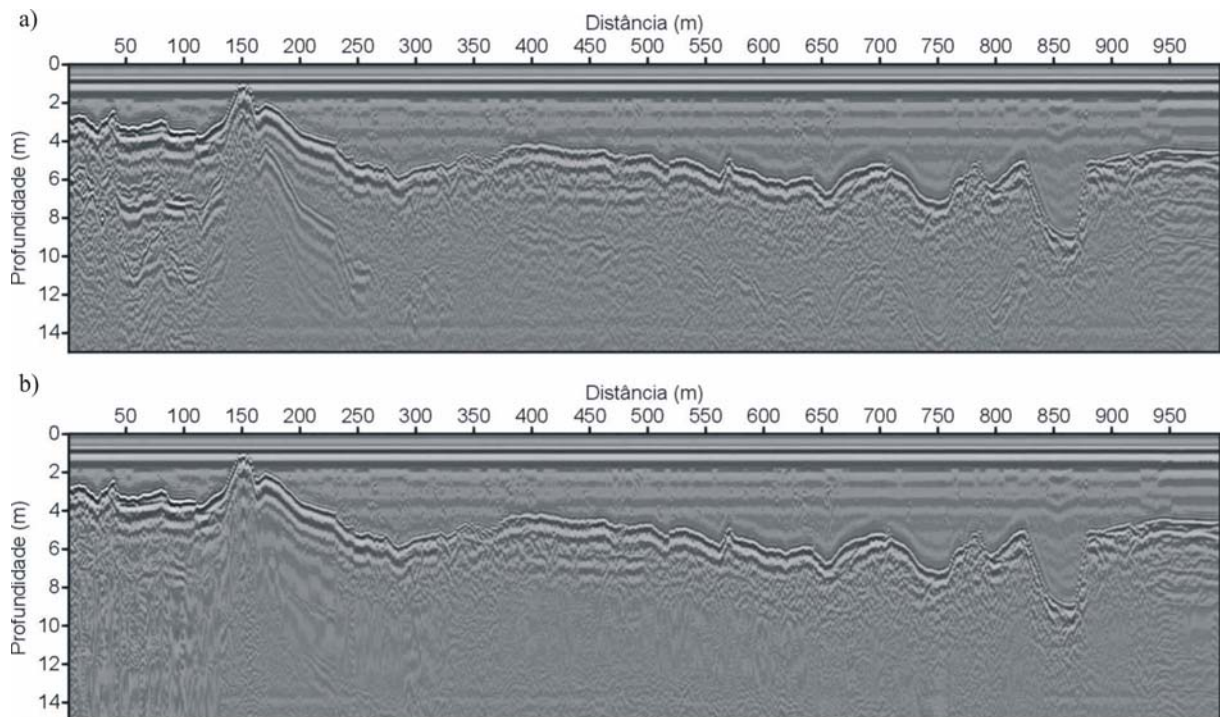


Figura 12 – Seção GPR de 100 MHz adquirida ao longo do Rio Taquari nas proximidades do Porto Santa Luzia, onde estão ocorrendo as avulsões. Seção processada sem a deconvolução em a) e a Seção obtida após a DP multicanal “por partes” em b).

deconvolução preditiva de Wiener-Levinson, sugerem o emprego desta metodologia como uma ferramenta eficaz na remoção de múltiplas de dados GPR adquiridos sobre rios e lagos.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Geofísica do IAG/USP pela infra-estrutura. À FAPESP (Processo No. 99/12690-2) pelo fundamental apoio financeiro para a aquisição dos dados. Ao geofísico Luiz Antonio Pereira de Souza (IPT) pelo apoio de campo e empréstimo dos catamarãs. Aos pesquisadores da EMBRAPA-MS (Dr. Osni Correa de Souza *in memoriam* e Dra. Maria Ribeiro Araújo) pelas proveitosas discussões sobre os processos sedimentológicos que ocorrem na Bacia do Pantanal Matogrossense. Aos revisores anônimos pelas críticas e sugestões que ajudaram a melhorar o conteúdo e a forma do manuscrito.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO MR, SOUZA OC, USSAMI N, PORSANI JL & SOUZA LAP. 1999. Estudos multidisciplinares sobre o sub-componente Bacia do Taquari, do Programa Pantanal. Projeto de Pesquisa. Governo do Estado de Mato Grosso do Sul. Mato Grosso do Sul: Embrapa-MS/IAG-USP/IPT/UFMS, 8 pp.

ASSINE ML & SOARES PC. 2004. Quaternary of the Pantanal, west-central Brazil. *Quaternary International*, 114: 23–34.

ASSINE ML. 2005. River avulsions on the Taquari megafan, Pantanal Wetland, Brazil. *Geomorphology*, Londres.

COLLISCHONN W, TUCCI CEM & CLARKE RT. 2001. Further evidence of changes in the hydrological regime of River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change? *Journal of Hydrology*, 245: 218–238.

DANIELS DJ. 1996. *Surface Penetrating Radar*. London, United Kingdom. The Institution of Electrical Engineers, 300 pp.

DAVIES EB & MERCADO EJ. 1968. Multichannel deconvolution filtering of field recorded seismic data. *Geophysics*, Tulsa, 33(5): 711–722.

EMBRAPA. 2003. *Veja o Brasil do espaço. Cartas: SE-21-Z-A-III-1-SO e SE-21-Z-A-III-3-NO*. Disponível em: <http://www.cdbrasil.cnpem.embrapa.br/>.

GODOY JM, PEREIRA JCA, VIEIRA LM & PADOVANI CR. 1998. Aplicabilidade da geocronologia da deposição de sedimento com ^{210}Pb como ferramenta na avaliação do assoreamento do Rio Taquari, Pantanal-MS. *Geochimica Brasiliensis*, 12(1/2): 113–121.

LIMA AP. 1999. *Deconvolução preditiva nos domínios t-x e tau-p utilizando filtros Wiener-Levinson multicanais*. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 70 pp.

- LIMA AP & PORSANI MJ. 2001. Deconvolução preditiva de reflexões múltiplas e peg-legs utilizando filtragem Wiener-Levinson multicanal. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19(3): 303–314.
- MOUTINHO L. 2003. Processamento de dados GPR adquiridos no Rio Taquari – Pantanal Matogrossense, com ênfase em deconvolução. *Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 127 pp.*
- MOUTINHO L, PORSANI JL & PORSANI MJ. 2003. Aquisição e processamento de dados GPR no Rio Taquari, planície do pantanal matogrossense. In: *International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, 8. Rio de Janeiro. *Proceedings*. [Rio de Janeiro: SBGf], 2003. *Expanded Abstract, CDROM*.
- PORSANI MJ & VETTER WJ. 1984. An optimality formulation for (Levinson) recursive design of L-Lagged minimum energy filter. In: *Annual International Meeting of SEG*, 54. Atlanta, USA. *Proceedings*. [Atlanta: SEG], 1984. *Expanded Abstract*, 1: 604–606.
- PORSANI JL, MOUTINHO L & ASSINE ML. 2004. GPR survey in the Taquari River, Pantanal wetland, West-Central Brazil. In: *International Conference on Ground Penetrating Radar*, 10. Delft, The Netherlands. *Proceedings*. [Delft: GPR'2004], 2004. *Expanded Abstract*, 2: 593–596.
- PORSANI JL, ASSINE ML & MOUTINHO L. 2005. Application of GPR in the study of a modern alluvial megafan: the case of the Taquari River in Pantanal Wetland, west-central Brazil. *Journal of Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 6(2): April 2005.
- ROBINSON EA. 1966. Multichannel Z-Transforms and Minimum-Delay. *Geophysics*, 31(3): 482–500.
- ROBINSON EA & TREITEL S. 1980. *Geophysical Signal Analysis*, Englewood Cliffs, Prentice-hall, N.J. 466 p.
- SOUZA OC. 1998. Modern geomorphic processes along the Taquari River in the Pantanal: a model for development of a humid tropical alluvial fan. *Thesis (PhD)*, University of California, Santa Barbara, 135 pp.
- SOUZA OC, ARAUJO MR & MERTES LAK. 2002a. Form and process along the Taquari River alluvial fan, Pantanal, Brazil. *Z. Geomorphology*, N. F. 129, p. 73–107.
- SOUZA LAP, PORSANI JL, SOUZA OC & MOUTINHO L. 2002b. Levantamento experimental GPR no Rio Taquari, Bacia do Pantanal Matogrossense. *Revista Brasileira de Geofísica*, 20(1): 69–72.
- USSAMI N, SHIRAIWA S & DOMINGUEZ JML. 1999. Basement reactivation in a sub-Andean foreland flexural bulge – The Pantanal wetland, SW Brazil. *Tectonics*, 18: 25–39.
- VERSTEEG R. 1996. Optimization of GPR acquisition and noise elimination parameters. In: *International Conference on Ground Penetrating Radar*, 6. Sendai, Japan. *Proceedings*. [Sendai: GPR'96], 1996. *Expanded Abstract*, 1: 289–292.
- YILMAZ O. 1987. *Seismic Data Processing*. Tulsa. Society of Exploration Geophysics Press, 526 pp.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Leandro Moutinho. Geofísico pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo – IAG/USP (2000). Mestrado em Geofísica pelo IAG/USP desenvolvendo a pesquisa “Processamento de dados GPR adquiridos no Rio Taquari – Planície do Pantanal Matogrossense, com ênfase em Deconvolução” (2003). Desde Março de 2003 vem atuando como Geofísico no Projeto de Aerolevanteamento da Bacia do Parnaíba, Convênio ANP/USP, nas áreas de magnetometria, gamaespectrometria e gravimetria aéreas.

Jorge Luís Porsani. Geólogo pelo Instituto de Geociências da UFBA (1987). Mestrado em Geofísica pelo Núcleo de Pesquisas Geofísicas Aplicadas à Prospecção de Hidrocarbonetos da UFPA (1991). De 1991 a 1996, trabalhou como Geofísico no Centro de Pesquisas da PETROBRAS. Doutorado em Geociências e Meio Ambiente pelo Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP (1999). Desde 01/12/1998 é Docente do Departamento de Geofísica do IAG/USP, atuando com métodos elétricos e eletromagnéticos (GPR) aplicados à geologia, geotecnia, exploração mineral, meio ambiente e arqueologia. Coordenou o Projeto de Instalação do Sítio Controlado de Geofísica Rasa-SCGR do IAG/USP (Fapesp 02/07509-1).

Milton José Porsani. B.C. em Geologia pela USP, 1976. Licenciado em Geologia pela Faculdade de Educação da USP, 1977. Mestre em Geofísica pela UFPA, 1981. Doutor em Geofísica pela UFBA, 1986. Pós-doutorado em Geofísica, Institute for Geophysics at University of Texas at Austin, EUA, setembro/92 a outubro/93. De 1979 a 1982 desenvolveu atividades de pesquisa ligadas aos projetos de prospecção de água subterrânea na Ilha de Marajó e Serra de Carajás. De 1986 até o presente é Pesquisador do CPGG/UFBA onde coordena o Programa de Exploração de Petróleo. Em 1990 foi contratado pela UFBA mediante concurso público para professor do Departamento de Geologia e Geofísica Aplicada do IGEO. Desde 2000 é professor Titular na matéria Exploração de Petróleo. Pesquisador do CNPq. Tem atuado no desenvolvimento de métodos e algoritmos de filtragem e processamento de dados sísmicos e na inversão de dados sísmicos e elétricos.