

MIGRAÇÃO DE DADOS DE RADAR (GPR) COM CORREÇÃO TOPOGRÁFICA SIMULTÂNEA

R. da Cruz Pestana & M. A. B. Botelho

Este trabalho apresenta dois métodos para realizar a migração de dados de radar penetrante no solo, mais conhecido como GPR (Ground Penetrating Radar), com correção simultânea de topografia. Considerando as similaridades cinemáticas entre dados de reflexão sísmica e de radar, principalmente em meios com alta resistividade, como é o caso de areias secas, torna-se possível aplicar várias etapas do processamento sísmico a dados de radar. Usando este fato, as migrações reversa no tempo (MRT) e "Phase-Shift" foram modificadas para realizarem a correção da topografia simultaneamente com o processo de migração. A seção de radar foi registrada sobre uma duna de areia seca e apresenta um forte refletor que corresponde ao nível freático, o qual aparece distorcido em função da topografia do terreno. A seção de radar apresenta ainda uma seqüência de refletores inclinados que correspondem a planos frentes das dunas. A aplicação das duas técnicas de migração possibilitou a obtenção de imagens, onde o lençol freático aparece na verdadeira posição espacial, e apresentou resultados com resolução suficiente para converter em profundidade feições tão finas quanto as estratificações cruzadas de uma frente de duna propagante. O levantamento de dados de radar em afastamento constante, associado à metodologia apresentada neste trabalho, a qual integra correção estática com migração em profundidade, permite o imageamento da subsuperfície, facilitando o estudo de áreas que apresentem uma estratigrafia complexa associada à uma topografia irregular. Esta metodologia, portanto, se constitui numa ferramenta muito útil para o detalhamento das estruturas rasas.

Palavras-Chave: Radar Penetrante no Solo (GRP); Migração; Correção topográfica.

MIGRATION OF GROUND-PENETRATING RADAR DATA WITH SIMULTANEOUS TOPOGRAPHIC CORRECTION - *This work presents two methods to perform migration of Ground Penetrating Radar (GPR) data with topographic correction simultaneously. Considering the kinematic similarity between seismic reflection and GPR data, mainly in a medium with high resistivity, like in the case of dry sand, several steps borrowed from the seismic processing can be applied to GPR data. Using this fact, reverse time migration (RTM) and Phase-Shift migration were modified to include during the migration process the correction of the topography of the ground. The GPR data acquired over a sand dune shows that the water table reflection is distorted by the irregular topography of the dune. The GPR section also presents a sequence of inclined reflectors corresponding to the cross-stratification generated by the prograding dunes. With these two modified methods of migration we have obtained images where the reflection from the water table was migrated to its real position and the reflectors corresponding to the dune fronts were also preserved. The methodology presented in this work allows to image the subsurface, therefore facilitating the interpretation and study where the ground has an irregular topography.*

Key words: Ground Penetrating Radar (GPR); Migration; Topographic correction.

Depto. de Geofísica Nuclear, Instituto de Física/PPPG
Univ. Fed. da Bahia, Rua Barão de Geremoabo, 128
Campus Universitário da Federação - Salvador/BA - CEP 40210-350
E-mail: reynam@pppg.ulba.br

INTRODUÇÃO

A técnica de Radar Penetrante no Solo – GPR - vem sendo usada como muita freqüência ultimamente na investigação das camadas mais próximas da subsuperfície (até 50 m), devido a sua grande habilidade de fornecer uma imagem de alta resolução, com a qual informações com mais detalhes das heterogeneidades da geologia podem ser obtidas.

A técnica GPR é, em princípio, bastante similar às técnicas de sísmica de reflexão e de sonar. No caso do GPR, um pulso de energia eletromagnética de alta freqüência (10-1000 MHz) é enviado através do solo por meio de uma antena. O pulso de radar se propaga com uma velocidade finita, que depende das propriedades dos materiais, e de forma similar a um pulso acústico é refletido e difratado devidos às variações presentes no meio propagante. O registro decorrente desse pulso de radar, isto é, a curva de amplitude versus tempo, é muito semelhante àquele obtido com a sísmica, só que em GPR o traço registrado representa as variações das propriedades elétricas do meio.

A velocidade de propagação e a atenuação são fatores que descrevem a propagação de um pulso eletromagnético no solo. Esses fatores dependem da constante dielétrica e da condutividade dos materiais. Na faixa de freqüências em que o GPR é operado (Davis & Annan, 1989), mostra-se que a velocidade de propagação do pulso de radar permanece constante em materiais com condutividade menor do que 100 mS/m e no caso de meios não dispersivos a velocidade de propagação de um pulso de radar é relacionada com a parte real da constante dielétrica. Esses meios não dispersivos são os mais apropriados para serem investigados pelas sondagens de radar.

Mais recentemente, com o aparecimento dos novos sistemas de GPR com gravação digital o processamento de dados de radar vem sendo cada vez mais empregado, sempre buscando uma melhor imagem da subsuperfície, para ajudar na interpretação dos dados adquiridos. Devido a grande similaridade cinemática entre as técnicas de radar e sísmica de reflexão, várias das muitas etapas do processamento de dados sísmicos têm sido utilizadas para o processamento de dados de radar (Fisher et al., 1992a,b; Neves et al., 1995).

Tal como os dados sísmicos, uma seção de radar com uma separação constante entre as antenas emissora-receptora, conhecida como seção de afastamento comum,

apresenta uma imagem da subsuperfície distorcida. Logo, a aplicação da técnica de migração que têm como objetivos o deslocamento espacial e focalização dos dados de radar se faz necessária. Vários trabalhos tem sido apresentados neste sentido (Rocca et al., 1989; Fisher et al., 1989, 1992a,b; Almeida & Botelho, 1995; Botelho & Pestana, 1996). Existe um grande número de algoritmos de migração desenvolvidos para a sísmica que podem ser utilizados em dados de reflexão de radar. Yilmaz (1987) apresenta uma excelente discussão sobre os vários métodos de migração. Recentemente, Fisher et al. (1992a) fizeram a aplicação da migração reversa no tempo (MRT) a dados de radar e também Fisher et al. (1992b) utilizaram o método "Split-Step" obtendo excelentes resultados.

Um fator que muito contribui para distorcer as reflexões é a variação topográfica do terreno onde se realiza o levantamento. Os dados sísmicos quando adquiridos sobre uma topografia irregular são comumente corrigidos para um patamar plano, ou seja, um datum referencial, antes de serem migrados. Um método simples e eficiente do ponto de vista computacional é a correção estática, onde os traços são deslocados em tempo desde a elevação até o datum escolhido. O método é simplesmente um deslocamento em tempo do traço. Entretanto, este método só funciona bem para os eventos que se propagam verticalmente. Conseqüentemente, quando a migração é aplicada em seguida à correção estática destes dados, os refletores são posicionados erradamente em profundidade. Para realizar a migração de dados que foram adquiridos sobre uma topografia não plana, existe também o método de "datuming" (Berryhill, 1979) que deve ser aplicado antes da migração. O método desenvolvido por Berryhill (1979), que se baseia na equação da onda, consiste num reposicionamento ou deslocamento vertical dos traços, que na verdade é uma correção estática e funciona corretamente tanto para os eventos verticais como os não-verticais. Mas, em função do alto custo computacional do procedimento de "datuming" o método de correção estática convencional é muitas vezes preferido, mesmo não sendo o mais preciso. Ambos os métodos acima citados fornecem uma seção no domínio $x - t$ corrigida dos efeitos topográficos.

Neste trabalho o nosso objetivo é utilizar a técnica de migração de dados sísmicos em dados de radar e realizar simultaneamente durante o processo de migração a correção topográfica. As técnicas que serão apresentadas nestes trabalhos fornecem seções no domínio $x - z$, o que, por si só, difere das técnicas tradicionalmente aplicadas

para correção topográfica. Iremos considerar dados de radar adquiridos com afastamento comum, isto é, distância constante entre as antenas emissora-receptora. Devido a pequena separação entre as antenas emissora-receptora, cerca de 3,0 m, a migração será, então, aplicada considerando-se as seções de radar, como se fossem seções de afastamento nulo. O erro inserido neste processo, em torno de 1,0 %, considerando o refletor de interesse correspondente ao lençol freático é negligenciável e será discutido nos resultados. Aplicaremos os métodos de migração MRT e "Phase-Shift", exatamente como usados na sísmica para dados após empilhamentos, porém modificados para possibilitar a correção topográfica. Os dados reais a serem utilizados foram adquiridos sobre uma duna de areia, cuja frente atual termina na borda da Lagoa do Abaeté, localizada na cidade de Salvador na Bahia.

MIGRAÇÃO COM CORREÇÃO TOPOGRÁFICA

Antes de aplicar os métodos de migração tomados do processamento de dados sísmicos à dados de radar, gostaríamos de enfatizar que a aplicação desses algoritmos só são justificáveis devido à similaridade das propriedades cinemáticas entre os dados de radar (GPR) e os dados sísmicos de reflexão. Devemos ainda salientar que a aplicação dos métodos de migração só devem ser usados quando os dados de radar satisfizerem as mesmas suposições inerentes a migração de dados de reflexão sísmica. Os aspectos cinemáticos da propagação devem satisfazer as leis da ótica geométrica e que a propagação deva ser linear e não dispersiva. Segundo Fisher et al. (1992b), felizmente os dados de radar satisfazem estas suposições quando a condutividade elétrica é baixa (<100 mS/m), e a frequência utilizada na faixa de 10 a 1000 MHz, que é exatamente a faixa operada pelos equipamentos de GPR.

Os métodos de migração em profundidade têm como principais objetivos corrigir as distorções nas estruturas geológicas e mover a energia das difrações para os seus pontos de origem e finalmente obter o modelo em profundidade ($x-z$), que corresponde ao modelo geológico da subsuperfície. Entretanto, além das variações laterais, existe outro fator que também contribui para distorcer as reflexões. Este fator é a topografia do terreno onde se realiza o levantamento dos dados. Durante o processamento dos dados a etapa de correção estática é responsável pela

remoção do efeito da topografia. Mais recentemente McMechan & Chen (1990) apresentaram um método para corrigir implicitamente o efeito da topografia em dados sísmicos, ordenados em tiro comum durante a etapa de migração, usando a migração reversa no tempo (MRT). Reshef (1992) também utiliza uma metodologia de correção topográfica para dados ordenados em família de tiro comum através do método de migração "Phase-Shift". Ambos trabalhos aplicaram os seus métodos apenas em dados sintéticos. Neste trabalho estamos aplicando os métodos de MRT e "Phase-Shift" em dados reais de GPR, adquiridos sobre uma duna. A seguir fazemos uma descrição de como os métodos acima citados podem ser modificados para realizar em uma única etapa a migração e a correção topográfica ou correção estática, em dados de radar adquiridos sobre uma superfície irregular.

Migração "Phase-Shift" com correção Topográfica

Considerando o caso da propagação de uma onda eletromagnética na frequência do radar em um meio bidimensional, no sistema de coordenadas cartesianas ($x-z$), o campo de onda registrado na superfície ($z = 0$), pode ser extrapolado em profundidade pelo operador de fase "Phase-Shift" (Gazdag, 1978), que é formulado da seguinte maneira:

$$\bar{P}(k_x, z, \omega) = \bar{P}(k_x, z - \Delta z, \omega) e^{-ik_z \Delta z}, \quad (1)$$

onde $\bar{P}(k_x, z, \omega)$ é de onda transformado para o domínio número de onda-frequência, z é a profundidade, Δz o campo é o passo de extrapolação em profundidade e k_z é dado por:

$$k_z = \left(\frac{\omega^2}{v^2(z)} - k_x^2 \right)^{1/2}, \quad (2)$$

onde k_z é o número de onda vertical, k_x é o número de onda horizontal, ω frequência angular e $v(z)$ é a velocidade do meio sem variação lateral.

Neste trabalho estamos considerando que os dados sejam de afastamento nulo, ou seja, posição emissora-receptora coincidentes. Neste caso, a condição de imagem a ser considerada é a do modelo do refletor explosivo (Loewenthal et al., 1976), que considera que uma seção de afastamento nulo pode ser simulada a partir da colocação de fontes ao longo dos refletores e detonadas no instante $t = 0$. Portanto, a condição de imagem é dada por:

$$P(x,z) = \sum_{\omega} \tilde{P}(x,z,\omega). \quad (3)$$

Para inicializar o processo de migração ao longo da superfície de registro, substituímos a Eq. (3) por:

$$P(x_s, z_s) = \sum_{\omega} (\tilde{P}(x_s, z_s, \omega) + \tilde{P}_{in}(x_s, z_s, \omega)). \quad (4)$$

A equação acima representa o campo de onda total em certa posição, que é dado pela soma do campo de onda extrapolado e o campo registrado nesta posição. O termo \tilde{P}_{in} é a seção em tempo (transformada para o domínio da frequência) registrada na posição (x_s, z_s) . Considerando-se que o campo registrado consiste apenas de ondas ascendentes, o termo $P(x_s, z_s)$ irá conter o campo extrapolado a partir das estações mais altas. No caso em que a superfície de registro for plana, ou seja, uma superfície situada acima das estações mais altas, este campo de onda será zero.

Através da Eq. (4), o processo de migração é realizado em uma malha regular e a continuação descendente é inicializada com um campo de onda zerado no topo da região que se situa acima das estações mais altas (Fig. 4), ou seja, acima do nível topográfico. Até que uma posição da topografia seja alcançada o campo de onda zerado é extrapolado usando-se a Eq. 1. Prosseguindo o processo de extrapolação, a cada passo de profundidade, os dados registrados são adicionados se existirem receptores na referida profundidade. Para a realização da continuação descendente, o campo de velocidade para os pontos da malha acima da topografia é normalmente o mesmo utilizado na primeira camada, ou seja, a camada próxima à superfície topográfica.

A implementação do esquema acima descrito exige que sejam definidos os pontos onde existem os receptores e a verificação a cada passo de extrapolação em profundidade se existe alguma estação e adição dos dados de acordo com a Eq. (4). Estas etapas não fazem parte do processo de extrapolação e, portanto, requerem um custo computacional adicional para a execução do método.

Migração Reversa no Tempo (MRT) com correção Topográfica

Para realizar o processo de extrapolação reversa no tempo, utilizamos operadores de quarta ordem no espaço e segunda ordem no tempo para solucionar a equação acústica da onda bidimensional. Esta equação é

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2(x,z)} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}, \quad (5)$$

onde $P = P(x,z,t)$ é o campo de onda sendo propagado, x é a coordenada espacial horizontal e z é a coordenada vertical, $v(x,z)$ é velocidade de propagação e t é o tempo.

Fazendo-se a substituição das variáveis (x,z,t) na equação da onda (Eq. 5) pelas variáveis discretas $(m\Delta x, k\Delta z, n\Delta t)$, o campo de onda pode ser representado por:

$$P(x,z,t) = (m\Delta x, k\Delta z, n\Delta t). \quad (6)$$

Utilizando-se dos operadores de diferenças-finitas de quarta ordem no espaço e de segunda ordem no tempo para resolver as derivadas na equação da onda, de forma análoga aos trabalhos de Botelho (1986) e Faria (1986), obtém-se a equação de diferenças-finitas que realiza o processo de migração (marcha reversa no tempo), a qual é dada por:

$$P_{m,j}^{n-1} = \left[2 - 2,5(A_x + A_z) \right] P_{m,j}^n - P_{m,j}^{n+1} + \frac{A_x}{12} \left[16(P_{m-1,j}^n + P_{m+1,j}^n) - (P_{m-2,j}^n + P_{m+2,j}^n) \right] + \frac{A_z}{12} \left[16(P_{m,j-1}^n + P_{m,j+1}^n) - (P_{m,j-2}^n + P_{m,j+2}^n) \right], \quad (7)$$

onde $A_x = \frac{(v\Delta t)^2}{(\Delta x)^2}$, $A_z = \frac{(v\Delta t)^2}{(\Delta z)^2}$, e Δt é o intervalo de amostragem no tempo. E para este esquema a condição de estabilidade é $A_x + A_z \geq 3/4$ (Faria, 1986).

A migração MRT é realizada usando um campo de velocidade onde a base da primeira interface é a própria superfície topográfica e o topo é uma linha horizontal correspondente a um nível de referência. Para dados adquiridos em uma configuração de afastamento comum - seção considerada como se fosse uma seção de afastamento nulo (fonte-receptor coincidentes), a propagação reversa no tempo se processa posicionando-se cada traço da seção de radar no ponto da superfície de registro correspondente ao respectivo receptor. O processo inicia-se com a última amostra do traço ($t = t_m$) até a primeira amostra ($t = 0$), obedecendo o conceito do refletor explosivo, usado para a migração de seções empilhadas, onde o tempo $t = 0$ corresponde ao tempo de imagem, ou melhor, o tempo em que se deve parar o processo e obter uma imagem em profundidade da subsuperfície.

Para realizar a migração dos dados de radar simultaneamente com a correção topográfica, usaremos o fato de que a velocidade do sinal de radar para materiais geológicos com baixa perda são relacionado a com a parte real da constante dielétrica K' (Davis & Annan, 1989), a qual é dada por:

$$v = \frac{c}{(K')^{1/2}}, \quad (8)$$

onde c é a velocidade da luz no espaço livre.

O trabalho de Davis & Annan (1989) apresenta uma tabela com os valores de K' para diversos materiais para frequência de 100 MHz. Logo é possível estimar a velocidade de propagação do pulso de radar para esses meios. Em nossas aplicações estamos particularmente interessados nas propriedades físicas das areias secas, posto que as estruturas que vamos imagear são formadas por dunas. A velocidade usada na migração obedecerá a relação dada pela Eq. (8).

EQUIPAMENTO E AQUISIÇÃO

O equipamento utilizado para a aquisição dos dados é do modelo SIR-2. Os dados foram adquiridos usando-se duas antenas separadas por uma distância de 3,0 m (para se evitar o acoplamento entre as antenas) operando na frequência de 80 MHz. As antenas são do tipo dipolo simples e constituídas de tubos de alumínio, com comprimento variável para cada frequência utilizada. No caso da antena de 80 MHz, o comprimento de cada antena é de 1,25 m. As antenas de 80 MHz e 100 MHz são as mais indicadas para estudos semi-detalhados das estruturas geológicas. As antenas têm uma taxa de emissão do pulso ajustável entre 8 e 64 kHz e o sistema é alimentado por uma bateria portátil de 12V_{DC} e tem uma potência de 100 Watts. Os dados foram adquiridos na forma contínua, ou seja, as antenas são deslocadas ao longo da linha e os traços são registrados automaticamente. Com a utilização deste procedimento é possível realizar um levantamento a intervalos regulares e pequenos. Para a realização do levantamento contínuo, utilizou-se de um trenó de madeira para permitir o reboque das antenas e também de uma roda que fornece a medida do espaçamento entre traços.

O local escolhido para se fazer o levantamento foi uma grande duna de areia nas proximidades da Lagoa do

Abaeté na cidade de Salvador, Bahia. A seção de radar foi registrada sobre o topo da duna, a qual apresenta variações na topografia. Neste levantamento foram adquiridos 1576 traços com 512 amostras por traços a uma taxa de amostragem temporal de 1,17 ns. Os traços foram registrados a cada 0,10 m.

RESULTADOS

A seção de radar mostrada na Fig. 1 foi registrada sobre uma duna de areia seca que apresenta um forte refletor que corresponde ao nível freático, indicado por "A" e também uma seqüência de refletores inclinados que correspondem a paleo frentes de duna, indicamos por "B". Os eventos indicados por "C" e "D" são reflexões laterais e uma múltipla de primeira ordem no nível freático, respectivamente. A seção de radar usada para a migração possui 523 traços espaçados de 0,3 m o que representa uma distância total de levantamento sobre a duna de 156,9 m (só utilizamos um terço) do número de traços da seção original que é de 1576 traços). Também só consideramos as 376 primeiras amostras de um total de 512 por traço, perfazendo um total de tempo de registro de 439,92 ns

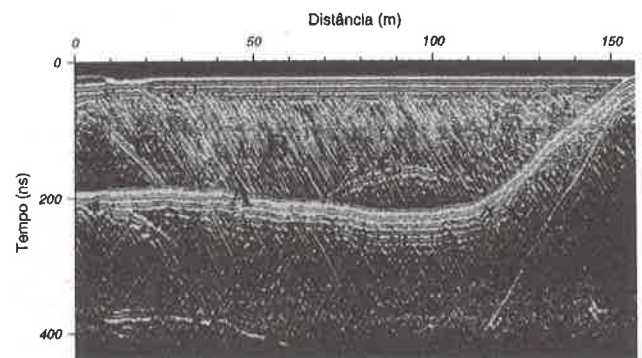


Figura 1 – Seção de radar com afastamento constante. A distância entre as antenas fonte-receptora foi de 3 m e os traços foram registrados a cada 0,3 m. Frequência de operação do GPR foi de 80 MHz. A - nível freático; B - estratificações cruzadas; C - reflexões laterais; D - múltipla de primeira ordem no nível freático.

Figure 1 - GPR section with constant offset. The distance between source and receiver antennas is 3.0 m and the traces were recorded at every 0.3 m. A 80 MHz antenna was used. A - water table; B - cross-stratification; C - lateral reflections; D - first order multiple at the water table.

para a migração. A seção foi registrada com distância de 3,0 entre as antenas emissora-receptora. Aplicamos os algoritmos de migração de afastamento nulo, pois devido a pequena distância entre as antenas, o refletor de interesse, correspondente ao lençol freático, que aparece na seção no tempo igual a 200,0 ns, após a correção de sobre-tempo normal (NMO) (Yilmaz, 1987), apareceria no instante de tempo igual a 198,5 ns, para a posição de afastamento nulo.

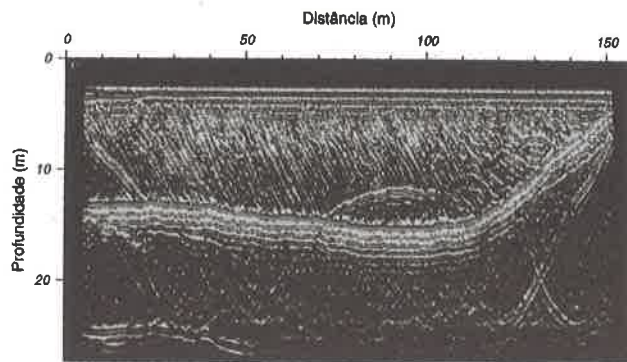


Figura 2 - Migração da seção de radar mostrada na Fig. 1, usando o método de migração reversa no tempo (MRT) sem correção topográfica.

Figure 2 - GPR migrated section from the data presented in Fig. 1 using reverse time migration (RTM) method without topographic correction.

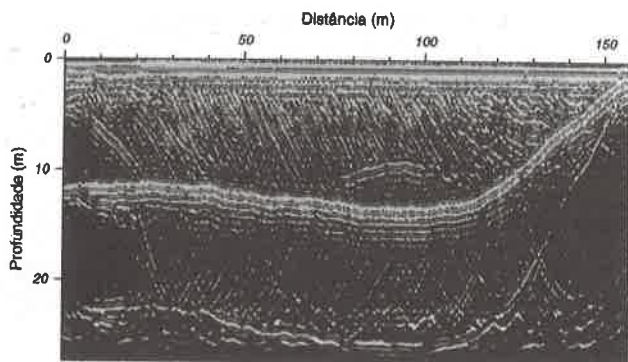


Figura 3 – Migração da seção de radar mostrada na Fig. 1 com o método "Phase-shift" sem correção simultânea da topografia. Como na Fig. 2 o topo do lençol freático se aproxima da superfície indicando a necessidade de se fazer uma correção topográfica antes da migração.

Figure 3 - GPR migrated section from the data shown in Fig. 1 with the Phase-Shift method without topography correction. As shown in the Fig. 2 the water table approaches the surface, indicating the necessity to perform a topographic correction before the application of any migration technique.

Esta diferença corresponde a um erro de 0,75 %. Considerando a magnitude do erro, optamos por aplicar diretamente os métodos de migração após empilhamento.

Inicialmente a seção apresentada na Fig. 1 foi migrada até a profundidade de 27,5 m a passos de 0,1 m, com os métodos "Phase-Shift" e MRT, considerando-se plana a superfície de registro. Os resultados obtidos com os respectivos métodos são mostrados nas Figs. 2 e 3. Ambos os resultados apresentam o nível freático subindo em direção à superfície, indicando a necessidade de se fazer uma correção da topografia antes da migração.

Para se realizar a correção topográfica durante o processo de migração precisávamos conhecer a topografia da duna. A curva representativa da topografia foi obtida em alguns pontos e interpolados para gerar a curva mostrada na Fig. 4. O perfil topográfico foi realizado tomando-se como referência o nível médio do mar. Na implementação dos algoritmos usados neste trabalho o nível de referência "0" mostrado na Fig. 4 corresponde a 45 m acima, do nível do mar. Para a migração reversa no tempo (MRT) e "Phase-Shift" usamos um campo de velocidade constante e igual a 0,12 m/ns - velocidade correspondente a areia seca (Davis & Annan, 1989). O resultado da migração com MRT é mostrado na Fig. 5, que apresenta o topo do lençol freático na sua correta posição e preserva as estratificações cruzadas correspondentes às frentes de duna. Nesta, técnica usamos uma faixa de absorção de 15 (quinze) traços em cada borda do modelo. O resultado mostrado na Fig. 6, obtido com a técnica "Phase-Shift", também apresenta a topografia na posição correta e o topo do lençol freático em sua verdadeira posição espacial. As estratificações cruzadas correspondentes às frentes de duna também foram preservadas, como na migração reversa no tempo.

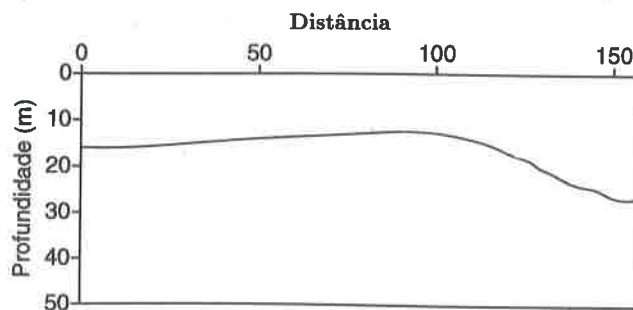


Figura 4 – Topografia da duna sobre a qual foi realizada a aquisição dos dados apresentados na Fig. 1.

Figure 4 - Dune topography over which were acquired the GPR data shown in Fig. 1.

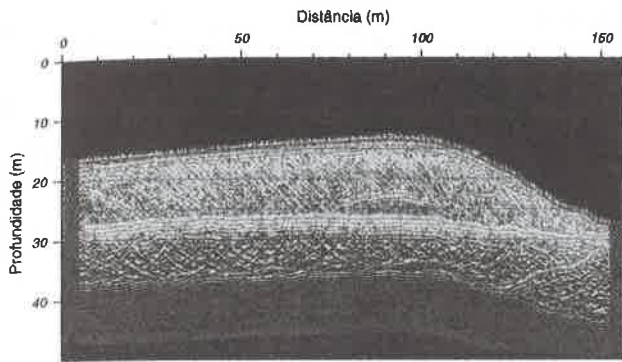


Figura 5 – Migração reversa no tempo com correção topográfica. O perfil topográfico utilizado é mostrado na Fig. 4. Nota-se que agora o topo do lençol freático aparece na sua verdadeira posição sub-horizontal e também que os refletores correspondentes às estratificações cruzadas provenientes das dunas progradantes são preservadas durante o processo de migração.

Figure 5 – Reverse time migration with topographic correction. The topographic profile is shown in Fig. 4. The result of this migration shows a water table position appears on a realistic sub-horizontal position, and also the preservation of the reflectors corresponding to the cross-stratification generated by the prograding dunes.

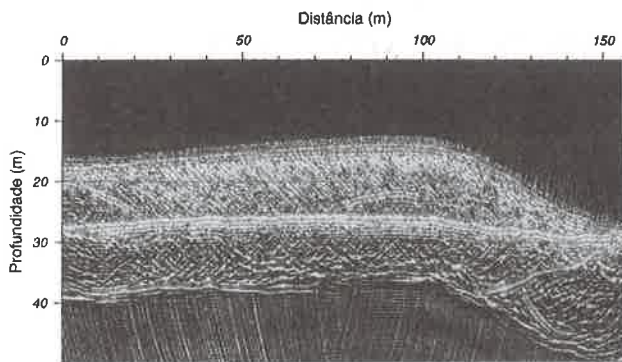


Figura 6 – Migração “Phase-shift” com correção topográfica. O resultado obtido com este método é bastante similar ao fornecido pela MRT (Fig. 5).

Figure 6 - Phase-Shift migration of the GPR data with topographic correction. The result obtained with this method is very similar to the RTM (Fig. 5).

CONCLUSÕES

Na migração de dados de radar com afastamento constante o procedimento de correção estática é realizada

implicitamente. Para realizar a migração dos dados adquiridos sobre uma duna de areia seca, os métodos de migração chamados de MRT e “Phase-Shift”, bastante usados para o imageamento de dados de reflexão sísmica, são utilizados. Esses métodos, que são usados em dados adquiridos sobre uma superfície plana, foram modificados com o intuito de possibilitar a migração de dados levantados sobre superfícies irregulares. Os resultados obtidos com ambos os métodos apresentam o topo do lençol freático corretamente posicionado em profundidade e preserva as estratificações correspondentes as frentes de dunas, demonstrando que os dois métodos podem ser utilizados na extrapolação e imageamento de dados GPR com topografia irregular. A metodologia apresentada neste trabalho que consiste do processo de migração em profundidade associada a correção topográfica simultânea, para o imageamento de subsuperfícies, a partir de seções de GPR, demonstrou ser uma ferramenta muito útil para definir a verdadeira posição espacial de objetos posicionados a profundidades rasas da subsuperfície.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa - CNPq pelo apoio através de bolsa de pesquisa, projetos 300312/88-1 e 301415/86-2415/86-2415/86-2 do primeiro e segundo autores, respectivamente. Também agradecem ao Sr. Jander Moraes pelo fornecimento da seção de radar utilizada neste trabalho e ao Dr. Amin Bassrei pela revisão do mesmo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. S. & BOTELHO, M. A. B.** - 1995 - Modelagem tridimensional de dados de radar (GPR) usando a técnica de diferenças finitas. Proceedings do 4º Cong. Inter. da SBGf, vol-I: 945-948, Rio de Janeiro, RJ.
- BERRYHILL, R. T.** - 1979 - Wave-equation datuming. Geophysics, **44**: 1329-1344.
- BOTELHO, M. A. B.** - 1986 - Modelamento Sísmico na Bacia do Recôncavo usando a Técnica de Traçamento de Raios. Tese de Doutorado, Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica/UFBA: 176 pp.
- BOTELHO, M. A. B. & PESTANA, R.** - 1996 - Migração de radar (GPR) com correção topográfica

- simultânea. Anais do XXXIX Cong. Brasileiro de Geologia, vol. II: 394-397, Salvador-BA.
- DAVIS, J. L. & ANNAN, A. P. - 1989** - Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophys. Prospecting*, **37**: 531-551.
- FARIA, E. L. - 1986** - Migração antes do empilhamento utilizando propagação reversa no tempo. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geofísica/UFBa: III pp.
- FISHER, E., MCMECHAN, G. A. & ANNAN, A. P. - 1992a** - Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data. *Geophysics*, **57**: 495-504.
- FISHER, E., MCMECHAN, G. A., ANNAN, A. P. & COSWAY, S. W. - 1992b** - Examples of reverse-time migration of single-channel, ground-penetrating radar profiles. *Geophysics*, **57**: 577-586.
- GAZDAG, J. - 1978** - Wave equation migration with the phase-shift method. *Geophysics*, **43**:1342-1351.
- LOEWENTHAL, D., LU, L., ROBERSON, R. & SHERWOOD, J. W. C. - 1976** - The wave equation applied to migration. *Geophys. Prospecting*, **24**: 380-399.
- MCMECHAN, G. A. K CHEN, H. W. - 1990** - Implicit static corrections in prestack migration of common-source data. *Geophysics*, **55**: 757-760.
- NEVES, F. A., ROULSTON, M. S. & MILLER, J. A. - 1995** - Source signature deconvolution of ground penetrating radar data. *Revista Brasileira de Geofísica*, **13(2)**:143-153.
- RESHEF, M. - 1992** - Depth migration from irregular surfaces with depth extrapolation methods. *Geophysics*, **56**: 119-122.
- ROCCA, F., CAFFORIO, C. & PRATI, C. - 1989** - Synthetic aperture radar: A new application for wave equation techniques. *Geophys. Prospecting*, **37**: 809-830.
- YILMAZ, O. - 1987** - *Seismic Data Processing* - SEG, Tulsa, Oklahoma, 536 p.

Submetido em: 28/08/96

Revisado pelo(s) autor(es) em: 25/03/97

Aceito em: 28/04/97

MIGRATION OF GROUND-PENETRATING RADAR DATA WITH SIMULTANEOUS TOPOGRAPHIC CORRECTION

The GPR technique is frequently used to investigate layers near the subsurface (up to 50 m), due to its ability to give an image with good resolution, and consequently information with more details of the structures.

GPR technique is in principle very similar to seismic reflection method and sonar. In the GPR case, a pulse of electromagnetic energy propagates into the medium with finite velocity, which depends on the electric properties of the materials. The GPR equipment operates in the frequency range of 10-1000 MHz and in this range the velocity of propagation of the GPR pulse remains constant in materials with conductivity less than 100 mS/m. When the medium is not dispersive, the velocity of propagation of a radar pulse is related to the real part of the dielectric constant (Davis & Annan, 1989).

More recently, GPR systems with digital recording allow the processing of GPR data to obtain a better image of the subsurface. Due to the kinematic similarity between the GPR data and seismic reflection data several steps of the seismic processing data have been used during the processing of GPR data. One of these procedures is migration, which has the goal of imaging the data into the correct spatial position and focalize the diffracted energy. Many authors have been working in this subject, like Fisher et al. (1992a,b); Almeida & Botelho (1995); Neves et al. (1995) and Botelho & Pestana (1996). To perform the seismic migration there

are many algorithms, see for example Yilmaz (1987). Fisher et al. (1992a,b) have applied migration to GPR data. They have used reverse time migration (RTM) and Split-Step migration of real radar data with excellent results.

The acquisition of GPR data over an irregular surface can distort the reflections and in this case a static correction has to be applied to correct for this effect. Static correction is a very simple method and consists of a time shift of the traces. This shift is equivalent to record the data into a plane datum. However, this method is only correct for events travelling vertically. The Berryhill (1979) method, which is based on the wave equation, has the same aim as the static correction. But, due to its high computational cost the first method is always used even though the results are not very good.

In this work we combine the migration technique and topographic correction as one procedure. We used RTM and Phase-Shift algorithms in the same way as used in seismic reflection data, but modified to include the correction of the topography. With these two methods we obtained good results with real GPR. The present methodology is a useful tool to be applied on GPR data acquired over an irregular topography; it allows to image the subsurface and facilitates the interpretation of areas with a complex stratification.