



Aplicabilidade do método magnetotelúrico em área de cobertura carbonática – estudo de caso na Serra do Mel, Bacia Potiguar

Paulo T.L. Menezes (Petrobras-E&P-EXP/GEOF/MP), Andrea Zerilli e Tiziano Labruzzo – WesternGeco EM

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

In the present paper we present the results of a MT field campaign at Potiguar basin. The main objectives of this survey were to test the MT signal to noise ratio and the feasibility of the MT data to define the base of Jandaíra Formation (shallow carbonates) and the structural framework of the basement.

To that end, MT data of 17 remote reference sites were processed and investigated through tensor analysis decomposition followed by 1D inversion. Three main geoelectrical units were identified: an outcropping strong resistor associated to Barreiras sandstones, followed by the carbonates of Jandaíra Fm and a strong conductor at depth, associated to siliciclastic sediments. The top of the basement was also properly imaged as a strong resistor underlying the sedimentary sequence.

Resumo

No presente trabalho apresentamos os resultados da interpretação de dados magnetotelúricos (MT) coletados em 17 estações na Bacia Potiguar, região da Serra do Mel (RN).

O objetivo do levantamento MT foi o de investigar a razão sinal-ruído na região e verificar a exequibilidade do método MT para definir a base da Fm. Jandaíra e a estruturação do embasamento cristalino em uma região onde o registro sísmico possui baixa resolução.

A programação inicial previa a aquisição da linha de 30 km com espaçamento entre estações de 1 km; entretanto devido a problemas de logística de campo não foi possível coletar dados com tal espaçamento na porção noroeste na linha gerando uma *gap* de dados nessa seção (Figura 1).

O processo de interpretação envolveu análise da dimensionalidade dos dados e posterior inversão 1D visando. Tal abordagem permitiu a definição de uma estratigrafia geoeletrica composta por três principais unidades sedimentares: um resistor superficial associado às areias da Formação Barreiras, seguido por calcários

da Fm. Jandaíra e um forte condutor associado aos sedimentos siliciclásticos Pré-Cenomanianos. O topo do embasamento da Bacia Potiguar (resistor) também é imageado apropriadamente pelos dados MT.

A variação dos valores de resistividade dentro da seqüência carbonática é interpretada como um indicativo da forte heterogeneidade da Fm. Jandaíra. O mesmo se sucede quanto às rochas do embasamento.

Introdução

O presente trabalho descreve o trabalho de interpretação de dados magnetotelúricos (MT) coletados em 17 estações na Bacia Potiguar (Figura 1), região da Serra do Mel (RN).

Dentre os principais objetivos destacam-se: a necessidade de conhecimento da razão sinal-ruído dos sinais eletromagnéticos de fonte natural na região; verificar a exequibilidade do método em definir a base da Fm. Jandaíra (Carbonatos) e o topo do embasamento em região onde o registro sísmico é precário.

No futuro, existe a possibilidade que o método MT venha ser utilizado para fornecer vínculos geométricos de modo a aperfeiçoar o processamento e imageamento sísmico na região.

A estratigrafia simplificada da Bacia Potiguar na região da Serra do Mel é composta pelas seguintes formações (Araújo e Feijó, 1994):

- Barreira (Arenitos Terciários).
- Jandaíra (Carbonatos do Cretáceo Superior).
- Açú (Arenitos e Folhelhos do Albiano-Cenomaniano).
- Alagamar (Arenitos, folhelhos e calcarenitos do Aptiano).
- Pendência (Arenitos folhelhos e conglomerados da fase *Rift*).

As formações Barreira e Jandaíra têm espessuras estimadas de 200 a 650 metros, respectivamente. A alta velocidade sísmica nos sedimentos próximos a superfície é uma das principais causas da degradação do sinal sísmico na região. A aplicação do método MT visa a fornecer uma imagem de mais alta resolução da estratigrafia da região estudada.



Figura 1: Localização das estações MT Serra do Mel (bandeiras amarelas) ao longo do perfil. Observar o gap de estações existentes na porção noroeste do perfil.

Qualidade dos dados MT

Os dados MT de quatro componentes (Ex, Ey, Hx, Hy) foram coletados no modo de série temporal, onde a aquisição é realizada em janelas de dados de tempo. Estas janelas são dependentes do comprimento da série temporal e da taxa de amostragem (em Hz).

Para este trabalho, utilizaram-se séries temporais com 512 pontos por janela e três diferentes bandas de amostragem: banda 4 (500 Hz) e banda 3 (50 & 25 Hz) e banda 2 (6,25 Hz). A faixa de frequência amostrada para todo o conjunto de dados da Serra do Mel cobriu de 0,001 a 250 Hz.

A aquisição foi feita no modo referência remota (RR) onde duas ou mais estações são adquiridas simultaneamente de modo que, na etapa do processamento, uma sirva de referência para a outra e vice-versa (Gamble et al., 1979).

A análise da Figura 2 mostra que os dados da estação local estão contaminados por uma componente de 60 Hz associada a ruído cultural (p.ex. linhas de transmissão de eletricidade). Esta componente, devido a sua maior intensidade, tende a mascarar visualmente e interferir com o sinal MT natural de outras frequências. Neste caso, o processamento no domínio da frequência com correlação de estação remota sem ruído pode ser utilizado para se obter estimativas confiáveis para o tensor impedância.

Na mesma Figura 2 são plotados também os canais elétricos (Ex e Ey) e magnéticos da estação remota, medidos simultaneamente com os dados da local. Os campos eletromagnéticos da estação remota, localizada em uma área eletromagneticamente quieta, não são contaminados pelos ruídos culturais de 60 Hz, exibindo somente os sinais naturais em diversas frequências.

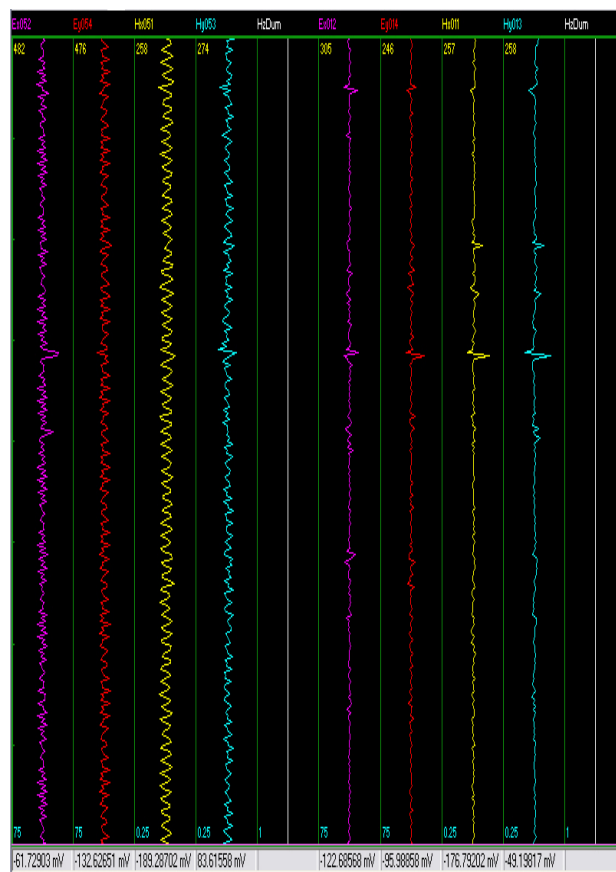


Figura 2: Séries temporais (janela com 512 pontos) para duas estações RR (banda 4 - taxa de amostragem de 512 Hz). Nos cinco painéis da esquerda encontram-se os canais elétricos (Ex052 e Ey054) e magnéticos (Hx051/Hy053 e Hz (não medido)) da estação local. Nos cinco painéis da direita encontram-se os canais elétricos (Ex012 e Ey014) e magnéticos (Hx011/Hy013 e Hz não medido) da estação de referência. Notar que os dados da estação local estão contaminados por forte componente de 60 Hz (ruído cultural), os da estação de referência não são contaminados por ruídos culturais.

Processamento e estimação da dimensionalidade dos dados MT

Os dados MT de todas as estações foram processados utilizando-se a metodologia de referência remota de Zerilli e Botta (1998) para estimação do tensor impedância. Apresentamos, a título de ilustração, as curvas de resistividade aparente, fase e diagrama polar para as estações MT15 e MT01 nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

Um parâmetro importante a ser observado para a determinação da dimensionalidade da Terra investigada (1D, 2D, 3D) é o comportamento das componentes do tensor impedância (Zxx, Zxy, Zyx e Zyy), representadas graficamente por duas quantidades extraídas a partir dos elementos da impedância, nomeadamente as curvas de resistividade aparente e fase.

Para uma Terra 1D temos que $Z_{xy}=Z_{yx}$ e $Z_{xx}=Z_{yy}=0$, em uma terra 2D temos que $Z_{xy}\neq Z_{yx}$ e $Z_{xx}=Z_{yy}=0$, para uma terra 3D todos os elementos são não nulos e diferentes entre si. Usualmente são plotadas para inspeção e interpretação somente as curvas da diagonal principal do tensor impedância (Z_{xy} e Z_{yx} nas Figuras 3 e 4).

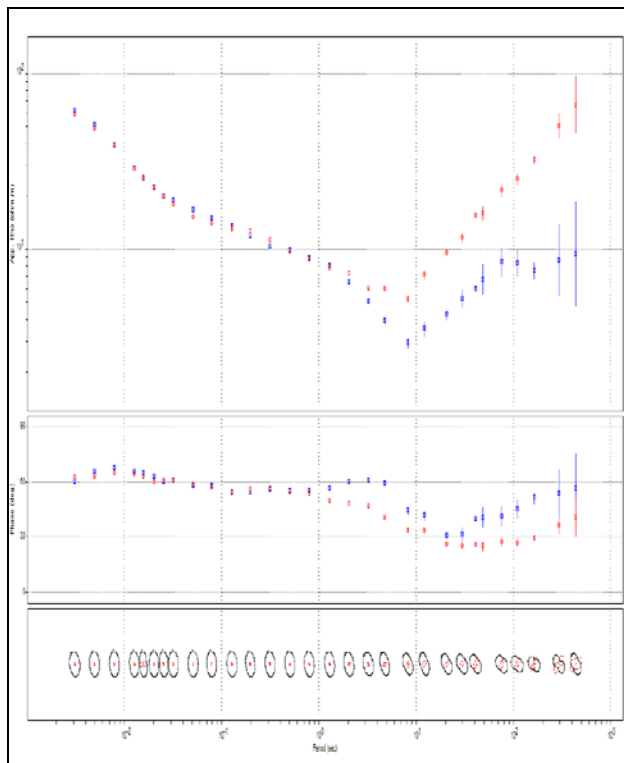


Figura 3: Estação MT15. Painel superior curvas de resistividade aparente. Painel médio – curvas de fase. Painel inferior – diagrama polar, círculo preto rotação Z_{xy} , círculo vermelho rotação Z_{xx} . Quadrados vermelhos representam a componente YX e azuis representam a componente XY.

A análise das figuras 3 e 4 mostra que, para a faixa de alta frequência (250 a 1 Hz) as curvas de resistividade aparente e fase são coincidentes, claro indicativo que a terra investigada possui características 1D, de acordo com o conhecimento geológico da região, pois nesse range de frequência investiga-se as seqüências sedimentares da Bacia Potiguar. Para frequências menores que 1 Hz, as curvas XY e YX se separam, num claro indicativo de que a Terra investigada adquire características 2D/3D. Neste range de frequência o método MT está investigando feições geológicas/estruturais ao nível do embasamento e crosta terrestre.

Como forma de corroborar a estimação de dimensionalidade dos dados investigados plotou-se no painel inferior das Figuras 3 e 4 o diagrama polar. Estes são construídos a partir da rotação de 5 em 5° dos elementos Z_{ij} do tensor impedância.

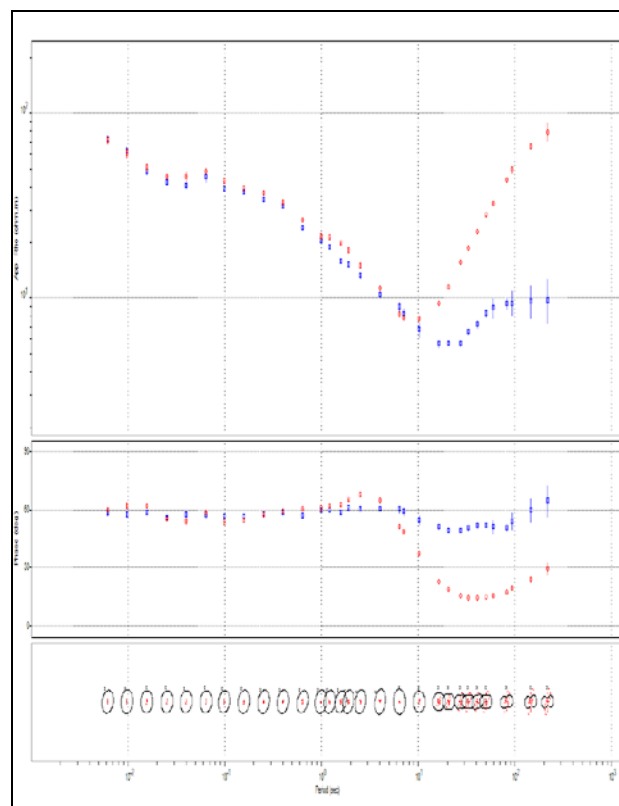


Figura 4: Estação MT01. Painel superior curvas de resistividade aparente. Painel médio – curvas de fase. Painel inferior – diagrama polar, círculo preto rotação Z_{xy} , círculo vermelho rotação Z_{xx} . Quadrados vermelhos representam a componente YX e azuis representam a componente XY.

Para uma terra 1D os elementos Z_{xx} ou Z_{yy} são nulos ou quase nulos, gerando um diagrama polar pontual, como pode ser observado nos diagramas plotados para as altas frequências nas Figuras 3 e 4 (pontos vermelhos no interior dos círculos pretos). Ainda para uma terra 1D os elementos Z_{xy} ou Z_{yx} quando rodados irão formar uma figura circular ou semi-circular, como as observadas nas altas frequências nas Figuras 3 e 4.

Para uma terra 2D/3D a rotação dos elementos da impedância gera figura em formato de hélice de avião, em função da variabilidade desses elementos, como ilustrado nas baixas frequências nas Figuras 3 e 4, onde ambas as componentes XY e XX apresentam tal comportamento.

Os nossos resultados foram também confirmados pela aplicação da técnica de decomposição tensorial de Groom-Bailey (Groom e Bailey, 1989). As curvas de resistividade aparente e fase foram então calculadas para os modos TE (transverso elétrico) e TM (transverso magnético).

INVERSÃO 1D DOS DADOS MT

Em virtude da análise dos dados MT ter indicado que, para a faixa de alta frequência (investigação rasa) as características da terra investigada são essencialmente 1D, utilizaremos métodos de inversão 1D para obter a definição da estratigrafia geoeletrica dos sedimentos e topo do embasamento na região estudada.

No presente estudo foram utilizadas duas técnicas de inversão com abordagens distintas: *layered-inversion* baseada na técnica de *ridge-regression* ou técnica de Marquadt (Marquadt, 1963) e *smooth inversion* pela metodologia de OCCAM (Constable et al., 1987). Os dois métodos foram aplicados aos dados TE de todas as 17 estações da Serra do Mel.

Apresentamos na Figura 5 a comparação dos resultados da inversão 1D (painel direito) e a informação de estratigrafia e log de resistividade (painel esquerdo) de poço localizado próximo à estação MT. De um modo geral os modelos inversos 1D obtidos por ambos os métodos de inversão são bastante semelhantes entre si, um indicativo da estabilidade/confiabilidade das soluções.

A informação obtida a partir do poço corrobora a presente interpretação e fornece vínculos para correlação das unidades geoeletricas com as unidades litoestratigráficas: Fm. Barreira (cerca de 100 ohm.m), Fm. Jandaíra (25 ohm.m), Formações Açu, Alagamar e Pendência (5 ohm.m) e rochas do embasamento (> 100 ohm.m). Observar que, como esperado, o ajuste entre os dados calculados e observados é muito melhor na faixa de frequência mais alta (comportamento 1D confirmado pela decomposição tensorial), do que na faixa de frequência mais baixa (comportamento 2D/3D confirmado pela decomposição tensorial).

Apresentamos na Figura 6 a seção de profundidade versus profundidade para o perfil MT na Serra do Mel. Esta seção foi construída a partir da interpolação das profundidades obtidas nos modelos inversos OCCAM calculados para cada estação MT ao longo do perfil.

Este tipo de abordagem permite a visualização da distribuição das unidades geoeletricas ao longo do terreno. A correlação com a estratigrafia dos poços fornece fortes vínculos para a interpretação aqui realizada.

Pode-se notar na Figura 6 que a Fm. Barreira, caracterizada pelo resistor superficial apresenta-se mais espessa na região central do perfil (porção central da Serra do Mel), afinando em direção aos extremos NW e SE da linha. O embasamento geoeletrico (resistor na base da seção) mostra-se fortemente estruturado, apresentando altos e baixos estruturais. Os altos estruturais são confirmados por informações sobre a profundidade do embasamento em poços na região que alcançaram esta unidade.

Além disso, a estruturação definida pelo método MT apresenta boa concordância com a definida por modelagem gravimétrica integrada à sísmica realizada na região (Oliveira e David, 2005).

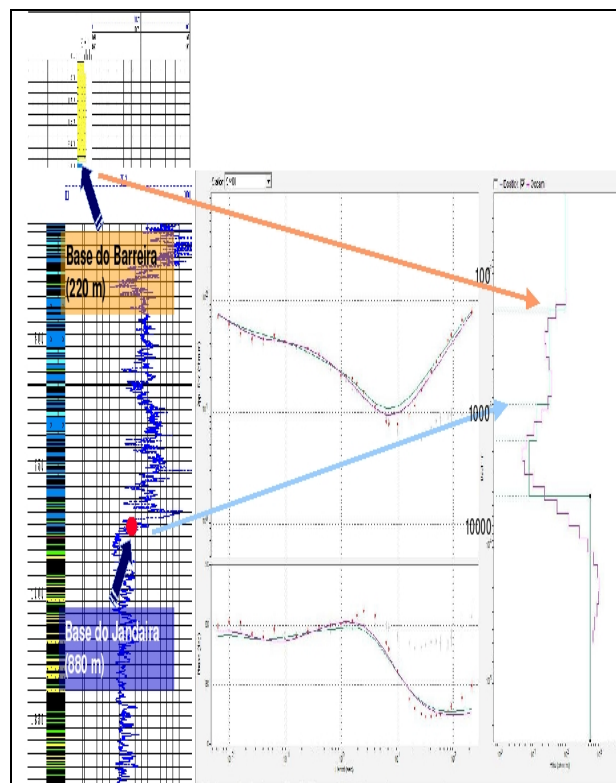


Figura 5: Comparação entre a informação de poço (painel esquerdo) com o resultado das inversões 1D dos dados TE da estação SM01 (painel direito), linha verde – *layered inversion*; curva lilás – inversão OCCAM. As setas indicam a correlação da informação da profundidade das interfaces no poço e as estimadas pelas inversões 1D dos dados MT.

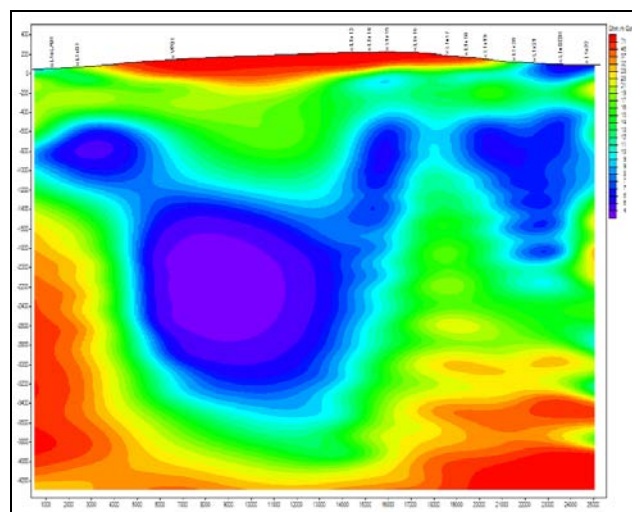


Figura 6: Perfil MT coletado na Serra do Mel. Seção de resistividade versus profundidade calculada pela interpolação dos modelos inversos OCCAM. Condutores da bacia (Açu, Alagamar, Pendência) unidades em azul. Embasamento geoeletrico, Fm. Jandaíra e Fm. Barreira caracterizados por resistores (faixa de cores do verde ao vermelho).

Um aspecto interessante a ser notado na Figura 6 é que o topo do embasamento na porção leste do perfil possui, sistematicamente, menores valores de resistividades do que as obtidas para o topo do embasamento na porção oeste do perfil.

Duas possibilidades podem ser aventadas para tal fato: diferentes tipos de litologias do embasamento e/ou a existência de uma zona de fraturamento no topo do embasamento na porção leste da área. Para a distinção entre essas duas hipóteses é necessária informação a priori independente.

Para analisar com mais detalhe as unidades geoeletricas associada aos carbonatos da Fm Jandaíra e a Fm. Barreira. Ilustramos na Figura 7 a seção de resistividade versus profundidade limitando a profundidade em 1000 m. A escala de cores foi mantida a mesma que a da Figura 6 para efeitos de correlação.

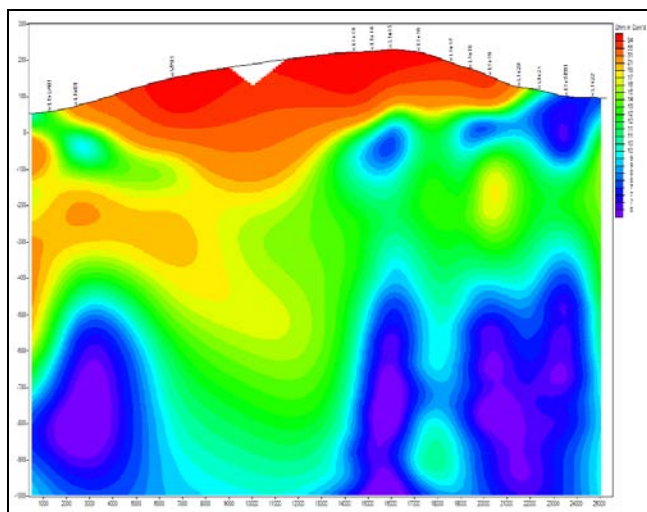


Figura 7: Perfil MT coletado na Serra do Mel. Seção de resistividade versus profundidade calculada pela interpolação dos modelos inversos OCCAM. Esta seção é limitada em 1000 m de profundidade de modo à melhor visualizar a estruturação interna e base das Fm. Barreira e Jandaíra.

Como dito anteriormente a Fm. Barreiras é caracterizada por um forte resistor no topo da seqüência geoeletrica, verifica-se que a base desse resistor varia bastante ao longo do perfil (transição amarelo-verde nos primeiros 200 metros de profundidade).

O mesmo se sucede com a base da Fm. Jandaíra, caracterizada pela transição do verde para o azul na porção basal da seção no intervalo entre 600 e 1000 metros de profundidade.

Um dos aspectos interessantes a ser notado é a variação de resistividade dentro da Fm. Jandaíra tanto na vertical (variação com a profundidade) quanto na horizontal (variação ao longo do perfil).

De acordo com a interpretação aqui proposta a Fm. Jandaíra caracterizar-se-ia por um topo mais condutivo e uma seção basal mais resistiva.

Uma possível interpretação geológica para tal fato seria de que as zonas condutivas poderiam estar associadas a zonas cársticas e/ou com maior porosidade (e preenchimento com fluidos) dentro do carbonato; enquanto as zonas resistivas representariam zonas mais maciças (menor porosidade) dentro do calcário Jandaíra.

Essa interpretação necessita de uma maior correlação com informação a priori da geologia para sua corroboração.

Conclusões

Os dados MT coletados no levantamento teste na Serra do Mel são de excelente qualidade, possuindo alta razão sinal-ruído. Os dados MT foram interpretados através de inversões 1D. Para a validação da interpretação aqui realizada estabeleceu-se a correlação com dados de resistividade e estratigrafia de diversos poços na região.

Através da inversão 1D foi possível delimitar três importantes interfaces em profundidade: base das Formações Barreira e Jandaíra e o topo do embasamento geoeletrico.

Esta nossa interpretação é compatível com estudos gravimétricos e sísmicos realizados previamente na área estudada.

Para uma interpretação mais acurada do topo do embasamento é necessária a aquisição de novas estações MT de modo a preencher o *gap* existente na porção noroeste do perfil. Além disso, é necessária a aplicação de metodologias de inversão 2D (Rodi e Mackie, 2001), uma vez que para tais profundidades os dados MT indicam claramente uma dimensionalidade 2D/3D. Esta etapa será realizada brevemente em virtude da continuidade do presente projeto de pesquisa.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte fornecido pela Petrobras e a permissão para a publicação do presente trabalho.

Referências

- Araripe, P. T.; Feijó, F. J., 1994. Bacia Potiguar. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v.8, n.1, 127-141.
- Constable, S.C., Parker, R.L., Constable, C.G., 1987. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52, 289-300.
- Gamble, T.D.; Goubau, W.M.; Clarke, J. 1979. Magnetotellurics with a remote reference. *Geophysics*, 44, 1.53-68.

- Groom, R.W.; Bailey, R.C. 1989. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion. *J. Geophys. Res.*, 93, 19 13-1925.
- Marquardt, D. W., 1963. An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters: *J. Sot. Ind. Appl. Math.*, 11, 431-441.
- Oliveira, J.A.B. e David, M.A.G., 2005. Mapeamento do embasamento Serra do Mel, Bacia Potiguar: integração sísmica com gravimetria. IV SINTEX. Aracaju, SE. 6p. Relatório Interno Petrobras.
- Rodi, W., Mackie, R.L., 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2D magnetotelluric inversion. *Geophysics* 66, 174–187.
- Zerilli A., Botta M. 1998. Advances in Magnetotellurics applied to extreme noise environments: Society of Exploration Geophysicists, 68th Annual International Meeting and Exposition, New Orleans, Louisiana, U.S.A., September 13-18.