



## RESPOSTAS MT DE SOLEIRAS DE DIABÁSIO MAGNÉTICAS DA PROVÍNCIA PETROLÍFERA DE SÃO MATEUS (SOLIMÕES/AM)

Marcos Kaíre Miguel Sobrinho e Lúcia Maria da Costa e Silva, UFPA

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11<sup>th</sup> 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 11<sup>th</sup> 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.

### Resumo/Abstract (Font: Arial Bold, 9)

The magnetotelluric modeling (MT) of the Petroliferous Province of São Mateus (Solimões Basin) illustrates the type of measures to be acquired in environments of interest for the oil and gas prospection in Brazil. We show the influence of the magnetic permeability of diabase sills. The results do not allow the visual identification of the sills. However, the sills response exist. We discuss the state-of-the art of the interpretation to discover the sills.

### Introdução/Introduction

A investigação sísmica abaixo de rochas básicas (soleiras de diabásio e derrames de basalto) e estruturas halocinéticas (domos de sal) é problemática devido ao alto contraste de impedância acústica que as mesmas apresentam (Nazaré, 2004). Para superar esses obstáculos, é apontada a necessidade de melhorias na metodologia de aquisição e do processamento de dados sísmicos bem como a utilização de métodos geofísicos complementares.

Investigações sobre aquisição e processamento sísmico vêm mostrando resultados promissores, em grande parte, porém, dependentes de informações a priori que podem ser fornecidas por métodos geofísicos complementares. Por outro lado, muito menor atenção tem sido dada aos métodos geofísicos complementares.

Rochas básicas e evaporitos apresentam valores elevados de resistividade, de modo que as ondas eletromagnéticas passam por esses materiais resistivos e são fortemente influenciadas pelos sedimentos condutivos abaixo dos mesmos, o que justifica o uso de métodos elétricos e eletromagnéticos. Há também contraste na densidade e na permeabilidade magnética entre esses materiais, o que justifica, por sua vez, o uso da gravimetria e da magnetometria, respectivamente.

Entre os métodos complementares, o método eletromagnético magnetotélurico (MT) tem sido apontado como um dos mais promissores, por trabalhar com vários períodos do campo eletromagnético natural, o que permite a investigação a diferentes profundidades tanto em terra, como no mar.

Este trabalho apresenta a modelagem MT da província petrolífera de São Mateus da Bacia do Solimões no esta-

do do Amazonas (Figura 1), cuja seção estratigráfica é rica em soleiras de diabásio. Modelagens MT de bacias brasileiras são raríssimas. Modelagens MT, em geral, consideram para o meio a permeabilidade magnética do ar, ou seja, que inexistem materiais magnéticos. No entanto, minerais magnéticos estão presentes em rochas básicas em quantidades suficientes para gerar anomalias magnéticas. Por isso, o efeito de minerais magnéticos existentes no diabásio foi, também, considerado.

### Metodologia para investigar o problema geológico /Method

Para fazer a modelagem foi usada uma versão aprimorada do programa de elementos finitos baseado em Rijo (1977).

O modelo geológico, como descrito entre os poços STM1 e STM2 da província São Mateus, que aparecem com o símbolo de descobridor/produzidor de gás ☀ na figura 1, foi transformado no modelo físico com a mesma escala na horizontal e na vertical (Fig. 2). O modelo físico necessitou de 64 células na horizontal e 32 na vertical de 200x200 m<sup>2</sup> (12,8 km de comprimento e 6,4 km de profundidade). Em cada nó entre duas células superficiais da malha foi disposta uma estação MT, totalizando 30 estações. Foram considerados períodos de 1 a 0,0002 s (1 a 20 kHz), logo, da banda AMT. Para corrigir o efeito de bordas laterais e da borda em profundidade, foram utilizadas mais 5 células com dimensões crescentes em direção a cada borda que não são mostradas na figura 2.

Duas famílias de modelos foram construídas, uma considerando a bifurcação de soleira de diabásio e a outra com o salto de soleira (estruturas 1 e 2 da Figura 1, respectivamente). Ambos os modelos possuem 10 camadas com 5 litologias com diferentes valores de resistividade, mostrados na figura 2. Apenas para a seqüência evaporítica foram feitos experimentos com três diferentes valores de resistividade.

Foram realizadas várias modelagens com a seqüência evaporítica colocada na posição ocupada pelo diabásio nos modelos saltado e bifurcado, considerando-se cada um dos três valores assumidos para a mesma, ou seja, 350 ohm.m, 130 ohm.m e 50 ohm.m. Os mesmos experimentos sem a soleira foram, então, repetidos com a soleira de diabásio de 450 ohm.m com permeabilidade magnética relativa igual a 1, 1,5 e 3.

### Resultados para o efeito da resistividade e do magnetismo das soleiras/Examples

Nas pseudo-seções obtidas com a diminuição da resistividade do evaporito sem a soleira, observa-se que a resistividade aparente diminui enquanto a fase aumenta,

porque é perdido cada vez mais o efeito do embasamento. As respostas TE e TM são praticamente iguais, indicando que o modelo comporta-se praticamente como unidimensional. Ocorre o análogo quando está presente a soleira, mas as respostas TE e TM são algo diferentes, indicando que o modelo afasta-se ligeiramente do unidimensional.

Exemplarmente, as medidas sintéticas obtidas com os evaporitos de 50 ohm.m no lugar da soleira são mostrados nas pseudo-seções da figura 3. Já as medidas obtidas com a soleira saltada de 450 ohm.m aparecem na

figura 4. Finalmente, considerando-se essa soleira magnética (permeabilidade magnética relativa igual a 3), obtêm-se as medidas reunidas na figura 5.

As posições das estações MT aparecem nas abscissas e o logaritmo do período, nas ordenadas. O logaritmo dos períodos cresce com a profundidade, de modo que as ordenadas da pseudo-seção refletem o aumento da profundidade. Os isovalores do logaritmo da resistividade aparente  $\rho_a$  aparecem coloridos e crescem do vermelho para o azul, enquanto os isovalores da fase  $\theta$ , crescem do azul para o vermelho. Logo, para um corpo condutivo,

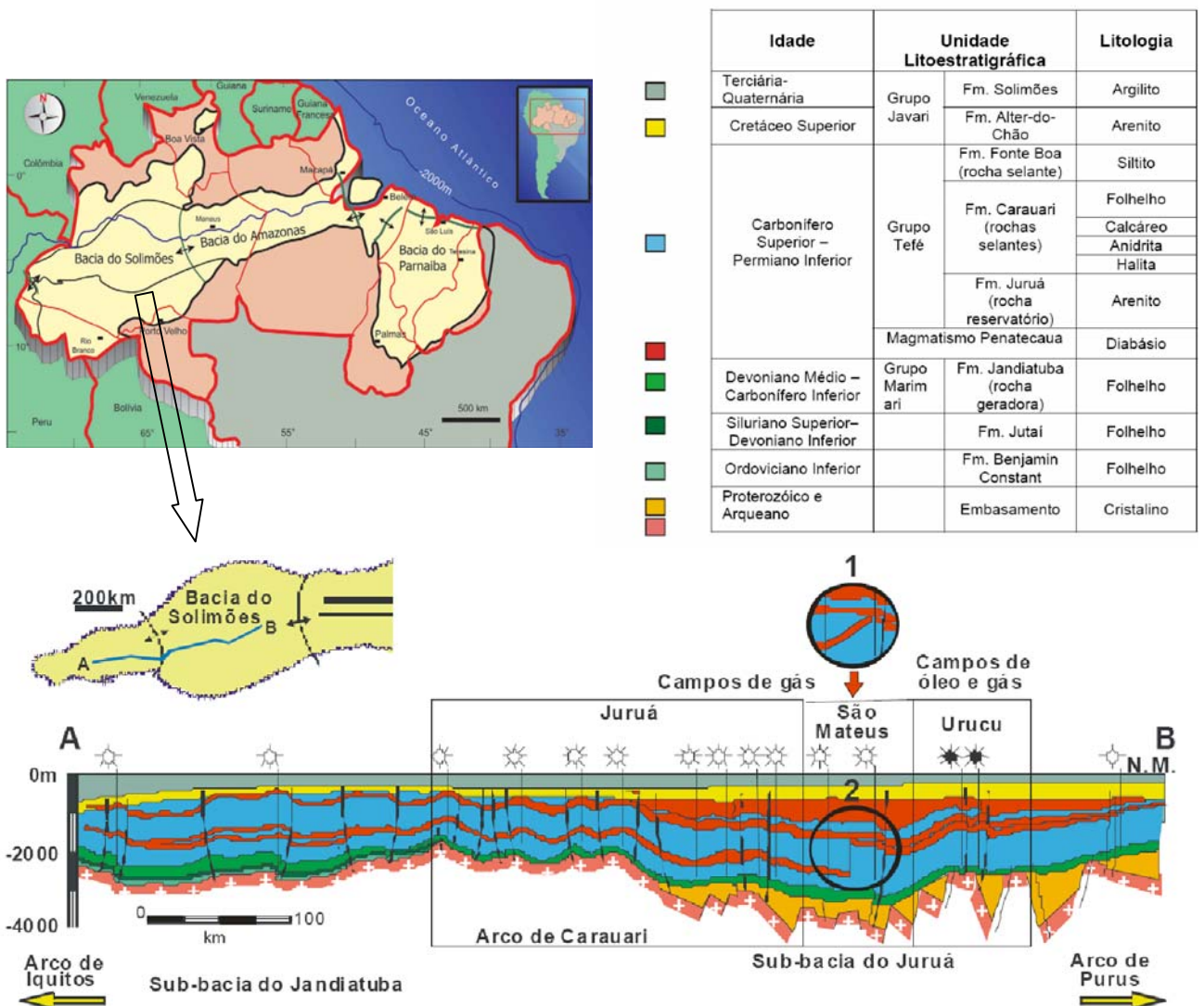


Figura 1 – Província São Mateus: Localização na Bacia do Solimões, seção geológica com o modelo de solteira (1) bifurcada e (2) soleira saltada e coluna estratigráfica (as formações Jutai e Benjamin Constant não ocorrem na sub-bacia do Juruá). Adaptada de Eiras (1998) e Wanderley Filho et al. (2005).

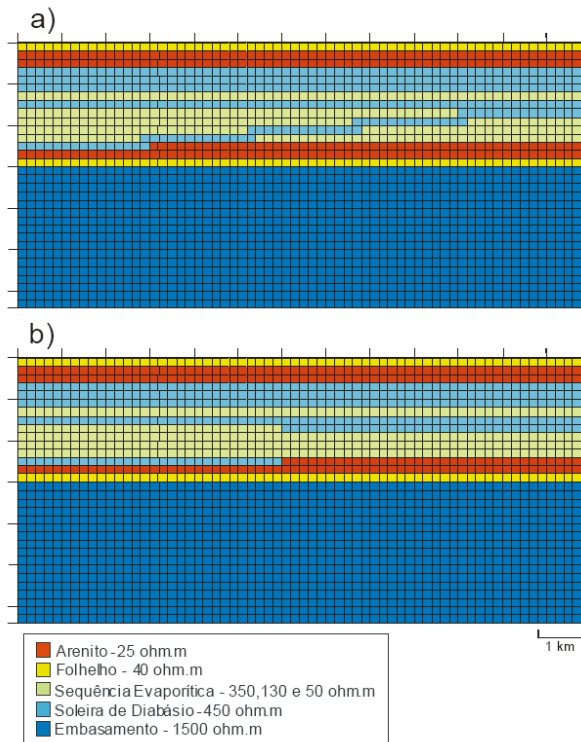


Figura 2-Modelo de resistividade para soleira de diabásio: a) bifurcada e b) saltada.

resistividade aparente e fase são trazidas para o vermelho, enquanto para um corpo resistivo, caso da soleira e do embasamento, para o azul. As pseudo-seções da esquerda de  $\rho_a$  e  $\theta$  foram obtidas com o modo TE, enquanto as da direita, com o modo TM. No modo TE, as correntes telúricas fluem na direção y, perpendicular ao plano representado na figura 2 (ou seja, ao longo da direção dos estratos). No modo TM, as correntes telúricas fluem na direção do perfil de estações (ou seja, perpendicularmente à bifurcação ou ao salto de soleira).

Na figura 3, tanto a resistividade no modo TE como no TM diminuem com o aumento do período (aumentam com a profundidade), logo o efeito do embasamento resistivo ainda não é perceptível. De fato, o embasamento se encontra a 3 km de profundidade e o *skin depth* para uma seção com embasamento sob pacote de 50 ohm.m (sequência evaporítica) seria de cerca de 3,6 km, mas o pacote possui resistividades de até 25 ohm.m (arenito), que reduzem ainda mais o *skin depth*. O experimento foi, em realidade, planejado de modo que o embasamento fique próximo à porção final das pseudo-seções de resistividade aparente. As fases na figura 3, contudo, detectam o embasamento, mas é sabido que a fase permite investigação algo mais profunda que a resistividade aparente.

Comparando-se a figura 4, obtida na presença do diabásio, com a figura 3, gerada sem o mesmo, observa-se que a resistividade aparente cresce enquanto a fase diminui para os maiores períodos (porção inferior das pseudo-seções). Isso decorre do fato que os evaporitos mais condutivos permitiam maior absorção da onda eletromagnética do que a soleira mais resistiva, blindando a penetração do campo e, portanto, reduzindo a profundidade de penetração (menor *skin depth*). Conseqüentemente, observa-se uma tendência gradativa para receber maior contribuição da resposta do embasamento. O pacote de sedimentos condutivos com a soleira vão formando uma zona única mais compacta. Isso significa, em outras palavras, que, com a presença do diabásio, fica mais fácil detectar o relevo do embasamento. A soleira não aparece individualizada, mas é bom lembrar que isso não impede o seu resgate, o que será abordado mais adiante.

Comparando-se a figura 5 obtida para o diabásio magnético com a figura 4 (diabásio não magnético) e a figura 3 (sem o diabásio), observa-se que a permeabilidade magnética aumenta a resistividade aparente na base das seções, evidenciando um efeito maior do embasamento. De fato, é previsto que a permeabilidade atenua o campo, diminuindo a penetração (redução do *skin depth*). A fase, conforme Li & Cao (2005) reportaram, sofre menor alteração.

Os experimentos com a soleira bifurcada mostram resultados equivalentes, mas a resposta da bifurcada e da saltada diferem. Em todos os gráficos, a resposta é essencialmente unidimensional.

#### Discussão e Conclusões/Results and Conclusions

Os resultados mostram que a introdução da soleira e da soleira magnética aumentam a profundidade de investigação como previsto pelo *skin depth*. Em ambos os casos, não se individualiza a soleira.

A resolução inferior do MT em relação à sísmica já é amplamente conhecida, porque a dissipação ôhmica em um meio condutivo limita a penetração das ondas EM de alta frequência. A investigação profunda é feita apenas pelas ondas de baixa frequência, que são ondas governadas pela equação de difusão, o que impede o imageamento de alta resolução como no caso da sísmica.

A amigabilidade e a usabilidade do MT, características da apresentação dos resultados do método, que é a interface entre o intérprete e o método geofísico, é também inferior a das seções sísmicas. Os dados sísmicos possuem um fortíssimo apelo geológico, enquanto os dados obtidos com o MT mostram o contrário. Essa é, provavelmente, a maior explicação pelo pouco interesse pelo MT dos profissionais que trabalham na exploração de petróleo. Por isso, é fundamental seguir com os resultados MT para a interpretação, pois a solução da interpretação é um modelo físico e este, sim, por ser próximo da geologia da área, é de grande amigabilidade e usabilidade pelo intérprete.

A não individualização da soleira pode sugerir que a interpretação não conduzirá a resultado algum satisfatório. A resposta da soleira, magnética ou não, está,

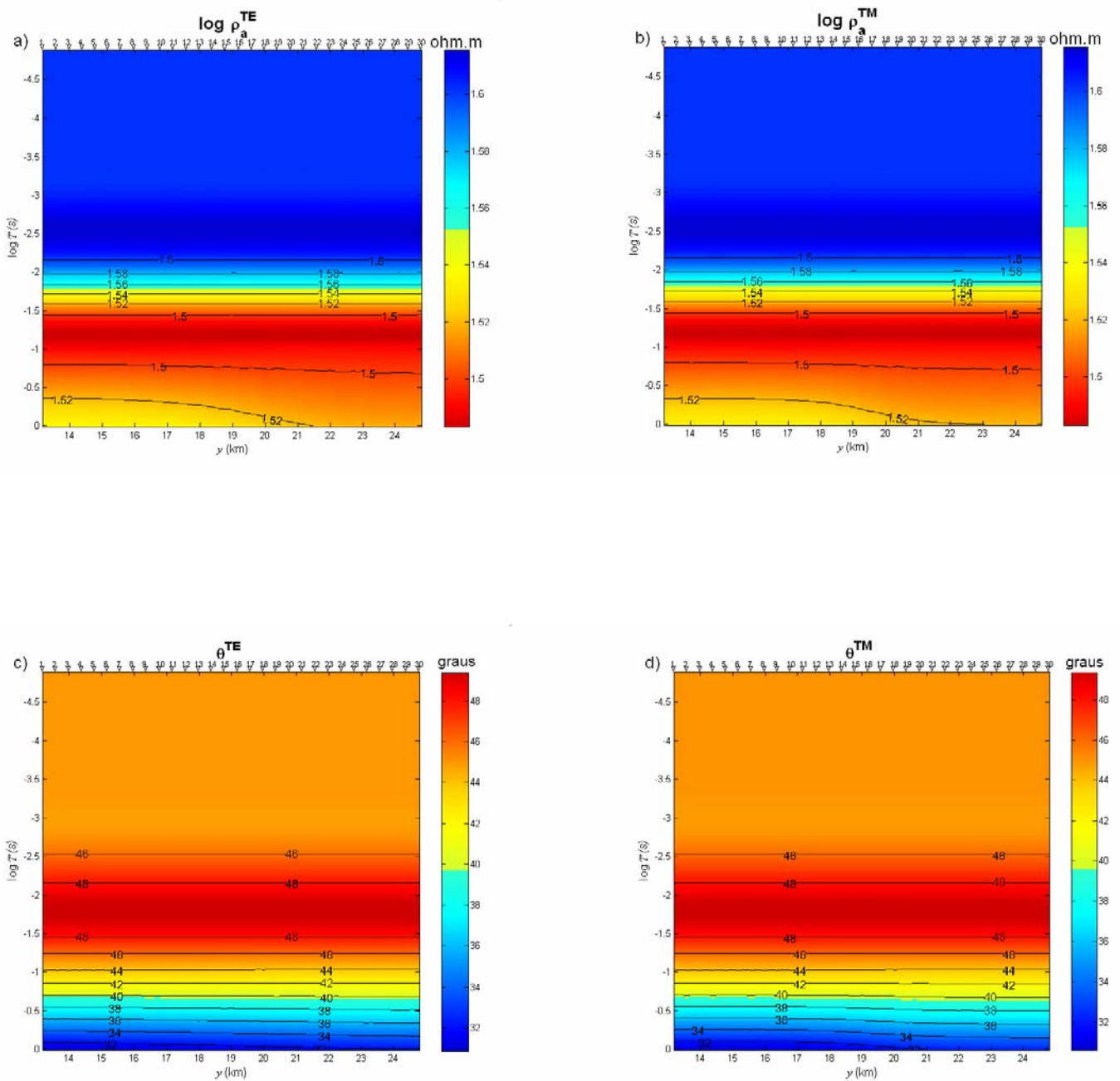


Figura 4 - Modelo saltado sem a soleira (seqüência evaporítica com resistividade de 50 ohm.m no lugar do diabásio. Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM).



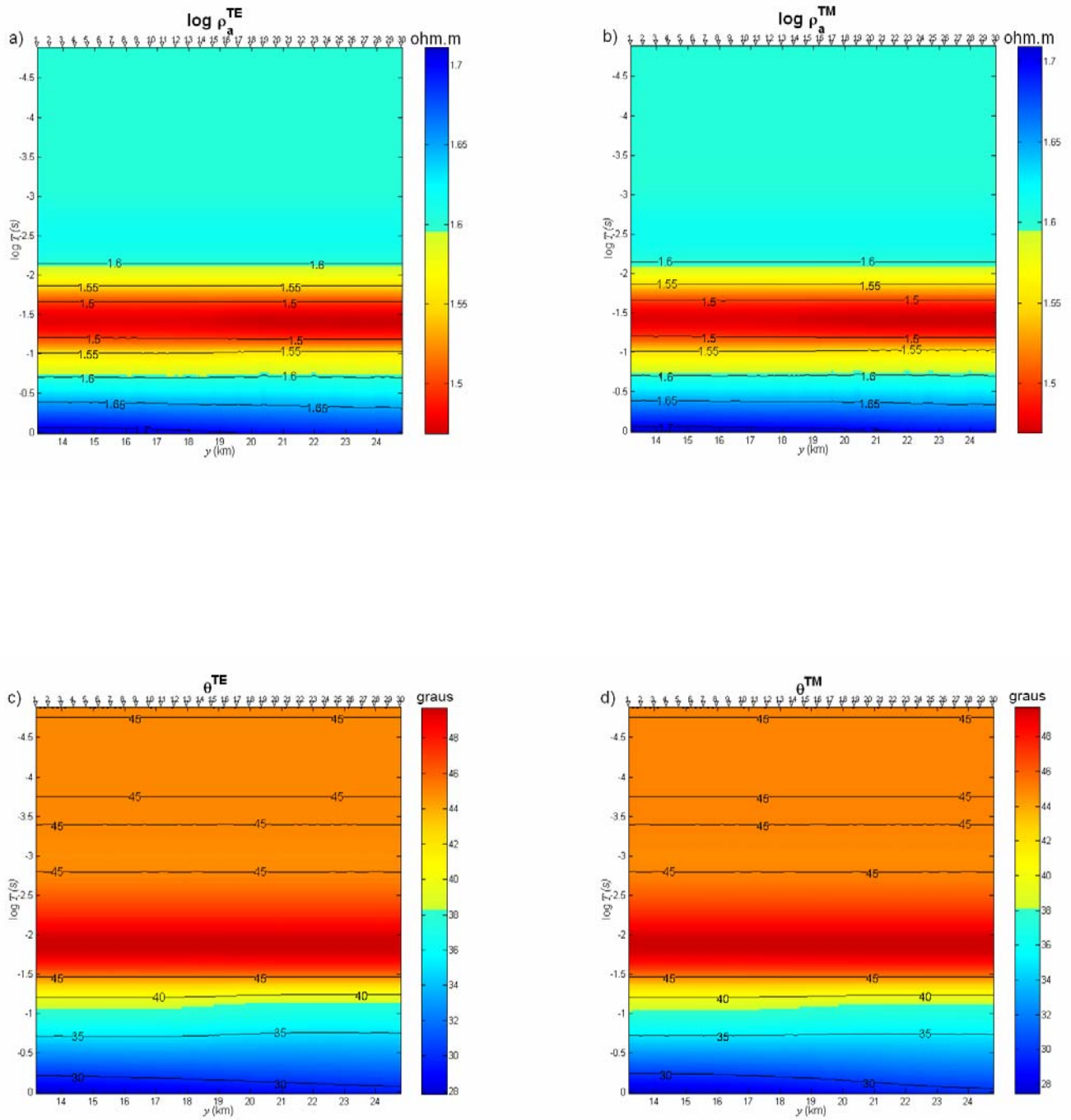


Figura 5 - Modelo saltado com soleira (soleira com 450 ohm.m e 1 como valor de permeabilidade magnética relativa, seqüência evaporítica com resistividade de 50 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

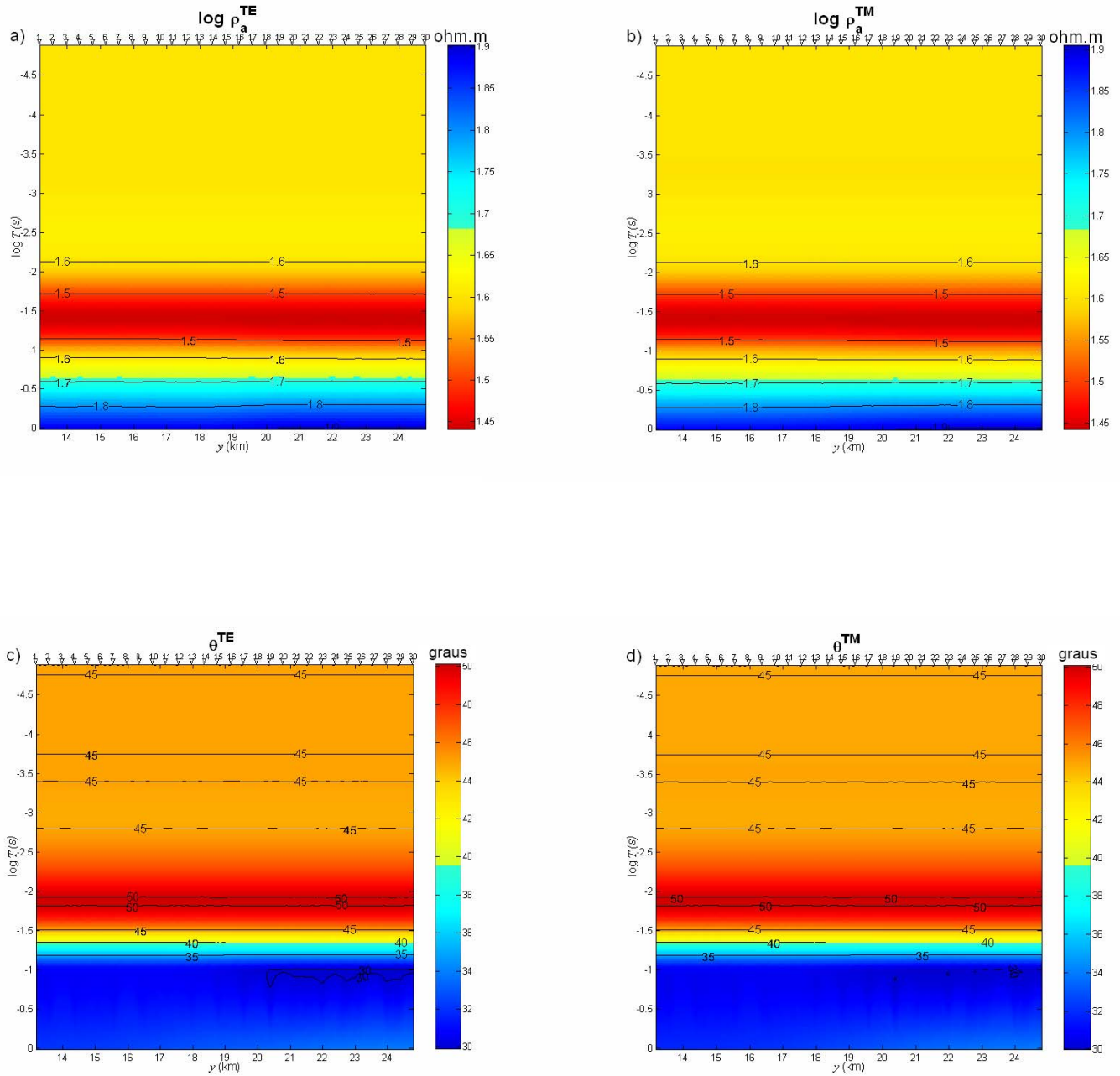


Figura 5 - Modelo saltado com soleira (soleira com 450 ohm.m e 1 como valor de permeabilidade magnética relativa, seqüência evaporítica com resistividade de 50 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

contudo, presente, caso contrário as curvas seriam todas exatamente iguais.

A questão, portanto, é como extrair a informação sobre a soleira, ou seja, como realizar a interpretação. Situação análoga é muito conhecida da prospecção de água com eletrorresistividade.

A interpretação pode ser feita pelo chamado método direto e pelo método inverso. Na interpretação pelo chamado método direto, o intérprete fornece os parâmetros físicos de um modelo pré-estabelecido, calcula a sua resposta e compara-a com as medidas, repetindo esse processo até encontrar parâmetros que permitam ajuste aceitável entre as medidas e os dados calculados; os parâmetros usados para obter o ajuste aceitável são, então, aceitos como estimativas dos parâmetros do modelo. Na inversão, o ajuste das observações é feito automaticamente, logo, a inversão é menos trabalhosa e, portanto, preferida.

Cabe, contudo, lembrar que o problema inverso busca inferir uma causa a partir de seu efeito. Em Geofísica, isso corresponde a usar medidas obtidas no campo para estimar uma distribuição de propriedade física não conhecida. O problema inverso consiste em estimar os valores de resistividade a partir da resistividade aparente e da fase.

Seja a interpretação direta ou inversa, ela lida com um problema inverso. Problemas inversos são problemas matematicamente mal-postos. Um problema é mal-posto quando sua solução não satisfaz a pelo menos uma das condições: existência, unicidade e estabilidade.

Na inversão, a existência de uma solução é garantida procurando-se a solução que permita o melhor ajuste no sentido dos mínimos quadrados entre os dados medidos e os dados teóricos. A não unicidade e a instabilidade requerem a introdução de informação a priori. Problemas mal postos são problemas dos quais se exige muita informação. Tikhonov (1963) provou que, por isso, a solução dos mesmos exige a introdução de informação a priori para que se consiga retirar as informações desejadas.

A informação a priori mais utilizada em inversão de um modo geral é a suavidade entre parâmetros adjacentes (a resistividade de diferentes células na malha representativa da subsuperfície no caso do MT). Considerando-se que a apresentação dos dados MT com a soleira não permite a individualização desta, a informação a priori da suavidade não é provavelmente adequada. Além disso, a permeabilidade magnética (um segundo parâmetro além da resistividade) não é considerada.

Conseqüentemente, os melhores resultados devem ser obtidos por meio do método direto, que é demasiado trabalhoso. Cabe, contudo, notar que a filosofia expressa na inversão de Last & Kubic (1983), adaptada para o MT por Silva (2006), provavelmente permite o resgate da soleira. De fato, o trabalho de Silva é caracterizado como adequado para a verificação de hipóteses específicas da interpretação (no caso, a existência de soleira bifurcada ou saltada). O método, contudo, demanda ainda muito tempo de computação.

Em resumo, pode-se afirmar que para o MT dar sua contribuição à prospecção de petróleo, é necessário, para a extração da informação presente no dados, esforço na área de interpretação (em especial, na redução do tempo de inversão). A despeito das respostas terem se mostrado 1D, o ideal será trabalhar com algoritmos 2D (para o caso da seção perpendicular a estudada ter um comportamento 2D, por exemplo).

#### **Agradecimentos/Acknowledgments**

Agradeço aos geólogos e geofísicos da Petrobras Norcílio Queiroz e a Wanderley Filho pelas informações fornecidas, ao professor Mario Vicente Caputo, pelo esclarecimento geológico, ao professor João Batista Corrêa da Silva, por discussões sobre nossas conclusões, e, especialmente, ao professor Luiz Rijo, pelo uso do seu programa e esclarecimentos sobre efeitos da permeabilidade magnética,

#### **Referências/References**

EIRAS, J.F., 1998. Tectônica, sedimentação e sistemas petrolíferos da Bacia do Solimões, Estado do Amazonas. In: TAHA, M.(Coord.). Searching for oil and gas in the land of giants. Buenos Aires: Schlumberger. Cap. 2, p.23-31.

LAST, B. J. & KIBIK, K., 1983. Compact gravity inversion. *Geophysics*, 48: 713-721.

LI, X. ; CAO, J., 2005. A study of the influence of magnetic susceptibility on MT response. *Chinese Journal of Geophysics*, 48: 1017-1021

NAZARÉ, C. P. P. Modelagem sísmica em um modelo geológico baseado em dados da Bacia do Solimões. 2004. 21f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2004.

RIJO, L. Modeling of electric and electromagnetic data. Salt Lake City. 1977. 242 f. Tese (Doutorado em Geofísica) - University of Utah, Department of Geology and Geophysics. 1977.

SILVA, L. M. C. e. DesG: uma nova metodologia para inversão e coleta de dados magnetotéluricos. 2006. xiv, 169 f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Curso de Pós Graduação de Geofísica. Belém, 2006.

TIKHONOV, A: N. Regularization of ill-posed problems. *Doklady Akad. Nauk SSSR*, 153: 49-52. 1963.

WANDERLEY FILHO, J. R., TRAVASSOS, W. A. S. & ALVES, D. B. O diabásio nas bacias paleozóicas amazônicas – Herói ou Vilão? *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 177-184. 2006.