



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA**

MARCOS KAÍRE MIGUEL SOBRINHO

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

**BELÉM-PA
2007**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA**

MARCOS KAÍRE MIGUEL SOBRINHO

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

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção de grau Bacharel em Geofísica.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Lúcia M^ª. da Costa e Silva

BELÉM-PA
2007

MARCOS KAÍRE MIGUEL SOBRINHO

**EFEITO DO MAGNETISMO SOBRE AS RESPOSTAS MT DE
SOLEIRAS DE DIABÁSIO DA PROVÍNCIA PETROLÍFERA DE
SÃO MATEUS (SOLIMÕES/AM)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Geofísica da Universidade
Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às
exigências para obtenção de grau Bacharel em
Geofísica.

Data da Aprovação: ___/___/___

Conceito: _____

Banca examinadora:

UFPA Prof. Dr^a.Lúcia Maria da Costa e Silva - Orientadora

UFPA Prof. Dr. German Garabito Callapino - Membro

UFPA Prof. Dr. Mário Vicente Caputo - Membro

Aos que possuem otimismo suficiente para apoiar recomeços. Em particular, a Lúcia Maria da Costa e Silva.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me possibilitou tudo o que conquistei até os dias de hoje.

Agradeço a meus pais Osvaldino Sodré e Maria Helena que sempre se preocuparam com meus estudos, nunca deixando faltar nada e sempre acreditando em mim, mesmo na hora que nem eu mesmo acreditava mais. A minha querida mãe que sempre sonhou com isso, hoje, onde ela estiver, sei que deve estar olhando feliz para mim com aquele seu lindo olhar.

Agradeço do fundo do meu coração a professora Lúcia Maria, pela extrema paciência e pela grande quantidade de conhecimento que ela me trouxe na hora de extrema escuridão.

Agradeço a meu grande amor Dagma Vivacqua por carinho e compreensão mesmo nos momentos de extrema dificuldade.

Agradeço aos geólogos Norcírrio Queiroz e a Wanderley Filho pelas informações concedidas para elaboração fundamental de meu trabalho.

Agradeço a professora Ellen Gomes por todo apoio dado desde o estágio na Petrobrás, sempre me dizendo para ter calma porque, um dia, eu estaria me lembrando das dificuldades pelas quais passei e me sentindo feliz por tê-las superado.

Agradeço ao Professor German Garabito e Priscila Nazaré por terem, desde a época da disciplina Grupo de Trabalho IV, quando o meu trabalho começou, fornecido informação com tanta paciência.

Agradeço a Patrícia Trindade pela troca de informações, parte das quais aqui presentes bem como do nosso primeiro trabalho enviado para um congresso (SBGF).

Agradeço ao professor Luiz Rijo, pelo uso do seu programa e informações sobre valores de permeabilidade magnética.

Agradeço ao professor João Batista Corrêa da Silva por ter tirado dúvidas sobre as conclusões que agora estão nesse trabalho.

Agradeço ao professor Mario Vicente Caputo pelo esclarecimento de grandes lacunas geológicas.

Agradeço ao professor José Luiz Gouvêa por ter despertado o meu interesse para os métodos Elétricos e Eletromagnéticos.

Agradeço a todos os professores, pois sem dúvida alguma todos contribuíram de alguma forma para esse momento.

Agradeço a todos meus colegas pelos anos inesquecíveis que tivemos, como as viagens de campo.

Agradeço a Benildez Lopez por todo carinho e consideração ao longo destes anos.

Agradeço a todos os funcionários do Centro de Geociências em especial a Álvaro Prestes, Afonso Ferreira, Luiscemir, Midori Maquino, Nascimento e outros, pois todos contribuíram de alguma forma e com o que podiam e nunca se negaram a realizar qualquer tipo de auxílio que eu pedi.

“Descobri um novo mundo em ver que é o sol e não o homem o centro do universo” (Galileu Galilei).

RESUMO

Este trabalho aborda dois tipos de contribuição à prospecção de petróleo com o método geofísico magnetotelúrico (MT) em ambientes geológicos em que estão presentes soleiras de diabásio, impedindo o imageamento sísmico. A primeira contribuição engloba uma série de modelagens MT com diferentes resistividades, enquanto na segunda contribuição, o efeito da permeabilidade magnética é estudado.

Nas modelagens realizadas fazendo-se variar a resistividade procurou-se investigar a resposta de dois modelos geológicos propostos para um perfil da Província Petrolífera de São Mateus, Bacia do Solimões. Observou-se que a presença de soleiras afeta a resistividade aparente e a fase nos modos TE e TM e, basicamente, permite que se investigue mais profundamente, alcançando o embasamento. Além disso, modelos de soleiras diferentes fornecem respostas diferentes, indicando que a distinção dos modelos poderá ser realizada.

Finalmente, o efeito magnético inerente ao diabásio, negligenciado nas modelagens MT, é calculado e analisado, mostrando que também permite que a investigação atinja maiores profundidades, até o embasamento, favorecendo conhecer a sua topografia.

Palavras Chave: Magnetotelúrico(MT). Susceptibilidade magnética. Resistividade. Soleira de diabásio. Bacia do Solimões. São Mateus.

ABSTRACT

This work presents two contributions of the magnetotelluric method (MT) to the petroleum exploration in a sedimentary environment intruded by diabase sills, where the seismic imaging presents serious difficulties. The first contribution includes MT modeling of geological unities presenting different resistivities while the second contribution is an analysis of the effect of the magnetic permeability.

The MT modeling aimed at computing the MT response of two known geological models along a profile across the São Mateus's Petroliferous Province, Solimões Basin. It came out that the presence of sills affects the apparent resistivity and the phase in both TE and TM modes, but does not precludes deeper investigation depths, which might even reach the basement. Besides, different sill models present different answers, indicating that their distinction is possible.

Finally, the inherent magnetic effect of the diabase, usually not considered in the MT modeling, has been calculated and analyzed, showing that it also allows furthering the investigation depth up to the basement, helping, in this way to estimate its topography.

Keywords: Magnetotelluric (MT). Magnetic Susceptibility. Resistivity. Diabase sill. Basin of Solimões. São Mateus.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	A BACIA DO SOLIMÕES	13
2.1	LOCALIZAÇÃO E HISTÓRICO	13
2.2	DESENVOLVIMENTO GEOLÓGICO	14
2.2.1	A Problemática ou solução diabásio	15
3	EXPERIMENTO SÍSMICO	18
3.1	MODELAGEM	18
3.2	PROCESSAMENTO SÍSMICO	19
4	EXPERIMENTO MT	22
4.1	FUNDAMENTOS MT	22
4.2	MODELAGEM	23
4.2.1	Efeito da resistividade das soleiras	25
4.2.2	Efeito do magnetismo das soleiras	45
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	59
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A sísmica de reflexão encontra, como é amplamente conhecido, dificuldades em imagear abaixo de rochas básicas (soleiras de diabásio e derrames de basalto) e estruturas halocinéticas (sal) devido ao alto contraste de impedância acústica que as mesmas apresentam.

Para superar esses obstáculos, é apontada a necessidade de:

- 1) melhorias na metodologia de aquisição e do processamento de dados sísmicos e
- 2) utilização de métodos geofísicos complementares.

As investigações a respeito de aquisição e processamento sísmico têm avançado mostrando resultados promissores, ainda que extremamente trabalhosos e, em grande parte, dependentes de informação a priori. Por outro lado, pouca atenção tem sido dada à utilização de métodos geofísicos complementares (JOSÉ, 2005).

As 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 magnetotelúrico (MT) tem sido apontado como o mais promissor, por trabalhar com vários períodos do campo eletromagnético natural, o que permite a investigação a diferentes profundidades.

Vários estudos envolvendo dados de MT, seguidos de sua interpretação através de inversão, contudo, não mostram resultados satisfatórios, como o trabalho de José (2005), realizado com dados obtidos a partir da modelagem da Bacia do Espírito Santo, e o de Porsani (2001), conduzido com medidas realizadas na Bacia do Solimões. É bastante divulgado que o MT, ao contrário da sísmica, não apresentaria “resolução” suficiente e, por esse motivo, produziria resultados insatisfatórios. Seria, contudo, essa a explicação para a obtenção de resultados insatisfatórios?

Para fornecer subsídios à discussão sobre a possível contribuição do MT à exploração de petróleo, este trabalho apresenta a modelagem MT da província petrolífera de São Mateus da Bacia do Solimões (Estado do Amazonas), cuja seção estratigráfica é rica em

soleiras de diabásio. Ênfase especial é dada à presença de minerais magnéticos no diabásio, porque na interpretação MT é considerado para o meio a permeabilidade magnética do ar, ou seja, que inexistem materiais magnéticos.

Na parte central da Bacia do Solimões, região do Rio Juruá, ocorrem três soleiras de diabásio com espessura total da ordem de 800 m, numa área onde a espessura total de sedimentos não ultrapassa os 2.000 m. A existência das soleiras na área revela uma geologia complexa, o que levou a gerência de exploração da Petrobras a evitar o levantamento de dados sísmicos nessa bacia por muitos anos. Com a ausência de dados sísmicos ou diante de dados sísmicos nem sempre tão reveladores, os poços exploratórios passaram a ser locados pela geologia de superfície, gravimetria, magnetometria ou dentro de "malhas de amostragem estratigráfica" (furos de sondagem) (método utilizado pelo Consórcio Paulipetro quando da exploração da Bacia do Paraná, através dos Contratos de Risco) (RODRIGUES, 2003).

Em 1978, a Petrobras decidiu realizar levantamentos sísmicos que permitiram a descoberta de uma grande estrutura anticlinal relacionada à falhas reversas de empurrão, um quadro de tectônica compressional inédito no contexto das bacias paleozóicas brasileiras. Um poço pioneiro - Rio Juruá nº 1 (1-JR-1-AM) - foi locado na anomalia estrutural, a despeito dos dados geológicos regionais estipularem condições de risco bastante elevadas e até mesmo superiores àquelas de outras bacias como a do Amazonas, que levou à descoberta do primeiro de uma série de campos de gás localizados ao longo de um alinhamento estrutural muito bem definido pela sísmica. Depois, em 1986, o primeiro de uma série de campos de petróleo foi descoberto à margem do Rio Urucu (RODRIGUES, 2003).

Certamente, outras descobertas são viáveis na Bacia do Solimões e, mais ainda, na Bacia do Amazonas. Em ambas, contudo, a sísmica nem sempre poderá fornecer resultados satisfatórios devido à presença de rochas básicas e estruturas halocinéticas e, isto, muito provavelmente, não poderá ser integralmente resolvido com melhorias na aquisição e no processamento de dados sísmicos, mas, sim, com a complementaridade de informações obtidas por outros métodos geofísicos. Daí a relevância deste trabalho, voltado ao estudo da possível contribuição do MT à exploração de petróleo na Bacia do Solimões e análogas.

O capítulo 2 apresenta uma síntese sobre a Bacia do Solimões, em que se destaca o seu desenvolvimento geológico.

O capítulo 3 apresenta resultados da Modelagem Sísmica das mesmas estruturas alvo do experimento MT, para permitir a comparação das respostas de Métodos diferentes mais à frente.

O capítulo 4 é dedicado ao Método MT. Uma breve revisão teórica do método precede a descrição do experimento computacional, que envolve a obtenção de respostas MT para dois modelos geológicos que foram propostos para um perfil da Província Petrolífera de

São Mateus, Bacia do Solimões. Primeiramente, é calculada a resposta MT para ambos os modelos sem as soleiras de diabásio e, depois, com as soleiras. Em seguida, é avaliado se a distinção entre esses modelos está contida nas respostas MT obtidas. Finalmente, o efeito magnético inerente ao diabásio, negligenciado nas modelagens MT, é calculado e analisado.

Os capítulos 5 e 6 englobam, respectivamente, discussão e conclusões sobre os resultados dos experimentos. Junto às conclusões aparecem recomendações para futuros trabalhos de modelagem bem como de interpretação dos dados MT por meio do método direto e de inversão e, ainda, de desenho de experimento.

2 A BACIA DO SOLIMÕES

2.1 LOCALIZAÇÃO E HISTÓRICO

A Bacia do Solimões está localizada na Região Norte do Brasil, entre os paralelos 2° e 8° S e meridianos 62° e 72° O de Greenwich, sendo limitada ao norte pelo Escudo das Guianas, ao sul pelo Escudo Central Brasileiro, a leste pelo Arco de Purus e a oeste pelo Arco de Iquitos (Figs. 2.1 e 2.2). Ocupa aproximadamente 480.000 km² dentro do Estado do Amazonas.

As grandes áreas sedimentares paleozóicas situadas na Região Norte do Brasil receberam inicialmente a denominação genérica de Bacia do Amazonas. Por razões operacionais, a Bacia do Amazonas foi dividida em três bacias, denominadas Alto, Médio e Baixo Amazonas, que são separadas pelo Arco de Purus e pelo Alto de Monte Alegre, respectivamente (EIRAS et al, 1994). Caputo (1984) sugeriu a designação de Bacia do Solimões em substituição a Alto do Amazonas, em face da evolução geológica diferenciada em relação às bacias do Médio e Baixo Amazonas, hoje referidas simplesmente como Bacia do Amazonas.

As primeiras tentativas de encontrar combustíveis fósseis na Amazônia datam do



Fig. 2.1: Mapa de localização da Bacia do Solimões e Amazonas.
Fonte: (WANDERLEY FILHO, 2006).

início do século. O primeiro poço foi perfurado em 1917, através do Serviço Mineralógico do Brasil (SMG), órgão do governo federal criado em 1905 para localizar jazidas de carvão e outros combustíveis. Em 1948, foram iniciados os primeiros levantamentos sísmicos na Amazônia, com o objetivo de encontrar hidrocarbonetos. Além do acesso difícil, as Bacias da Amazônia revelaram uma geologia complexa e conduziram a resultados insatisfatórios de sísmica. Ainda assim, o potencial petrolífero foi revelado na Bacia do Solimões, que é, até o momento, a única bacia sedimentar brasileira com produção comercial de petróleo a partir de rochas paleozóicas.

Pertence à Bacia do Solimões, Sub-bacia do Juruá, o reservatório de Urucu, um dos mais importantes reservatórios produtores de hidrocarbonetos do Brasil. O óleo de Urucu é de alta qualidade, sendo o mais leve óleo processado nas refinarias do país (a grande quantidade de sal presente nos líquidos das formações impediram que as bactérias o degradassem deixando-o viscoso, como os óleos encontrados em outros reservatórios no País) (EIRAS, 1998). O Urucu produz, em média, por dia, 55 mil barris de óleo e 9,7 milhões de metros cúbicos de gás natural. Esse volume faz do Amazonas o segundo produtor terrestre de petróleo e o terceiro produtor nacional de gás natural. A produção de Urucu abastece os estados do Pará, Amazonas, Rondônia, Maranhão, Tocantins, Acre, Amapá e parte do Nordeste.

2.2 DESENVOLVIMENTO GEOLÓGICO

A Bacia do Solimões está situada sobre o substrato proterozóico formado por faixas móveis, acrescidas a um núcleo mais antigo, denominado província amazônica central (Thomaz Filho et al, 1984). Na sub-bacia do Juruá, esse substrato ocorre a uma profundidade de cerca de 4.000 m (EIRAS, 1998).

Nos 4000 m de estratos fanerozóicos estão registrados eventos tectônicos decorrentes das interações ocorridas nas bordas das pretéritas placas litosférica gonduânica e na atual placa sul-americana, esses fenômenos geológicos induziram epirogenias periódicas no interior dessas placas, que reativaram os arcos regionais e controlaram as invasões marinhas, as depressões deposicionais e os processos erosivos, com durações variáveis, além de magmatismo.

As seqüências paleozóicas compreendem o registro de várias incursões marinhas, embora com preenchimento sedimentar essencialmente siliciclástico (com exceção da seqüência permocarbonífera).

As seqüências mesozóicas, por serem escassas, evidenciam um período de

intensos soerguimentos, erosões e magmatismo. É do Mesozóico o evento mais importante e de maior intensidade, denominado tectônica Juruá. Esse evento reativou estruturas antigas e gerou dobras anticlinais e falhas reversas de direção preferencialmente NE-SO e secundariamente NO-SE. As dobras anticlinais compõem as trapas das acumulações de hidrocarbonetos. Também no Mesozóico, durante o Triássico e o Jurássico, ocorreram intrusões básicas sob a forma de diques e soleiras na seção Paleozóicas, provocadas pela abertura do Golfo do México e Atlântico Norte; a grande assimilação magmática das seções evaporíticas revela que essas estruturas serviram como conduto para o magma Caputo (1990).

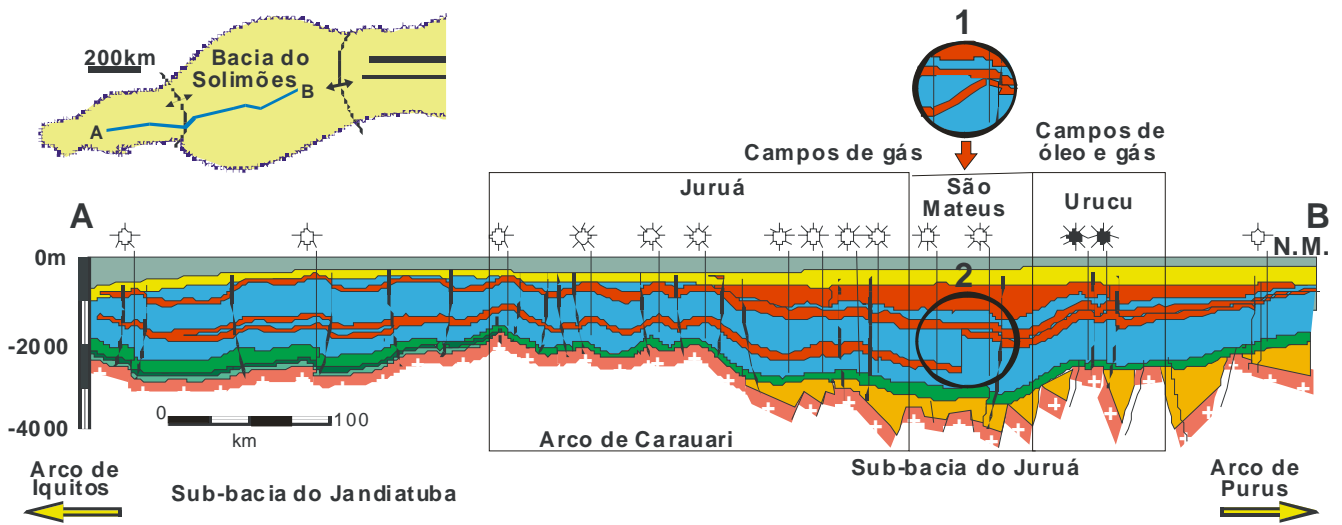
Finalmente, as seqüências cenozóicas, essencialmente continentais, evidenciam o término do período evolutivo da bacia (EIRAS, 1998).

2.2.1 **A Problemática ou solução diabásio**

Para existência de óleo ou gás é preciso que se tenha uma rocha que seja a geradora de hidrocarbonetos, de uma rocha que os armazene, uma rocha que seja selante e uma trapa. As rochas geradoras, reservatório e selantes fazem parte da seqüência paleozóica que é, por isso, a unidade sedimentar mais importante da Bacia do Solimões (vide Fig. 2.2).

As rochas geradoras são formadas pelo acúmulo de grande quantidade de matéria orgânica soterrada bruscamente de modo a não ocorrer a sua decomposição por bactérias aeróbicas, sendo, portanto um processo anaeróbico a geração de hidrocarbonetos. Três fatores determinam a potencialidade de uma rocha como geradora: quantidade, qualidade e o estágio de maturação que a matéria orgânica contida nesta rocha apresenta (CAPUTO, 1990). As rochas geradoras na bacia do Solimões são folhelhos com até 40 m de espessura e máximo de 8% de carbono orgânico, coloração preta. Esses folhelhos foram formados em ambiente marinho glacial e pertencem à formação Jandiatuba (Devoniano Superior).

As rochas selantes são rochas que, por possuírem baixíssima porosidade, servem para impedir que o óleo, por ser menos denso que a água, tenda a subir espalhando-se pelas camadas. As rochas selantes efetivas na Bacia do Solimões são as anidritas e halitas pertencentes às seções carbonáticas da formação Carauari com espessura máxima de 1300 m. A base da seção carbonática é caracterizada por camadas de anidrita, folhelho e calcário fechado intercalado com camadas de arenito da Formação Juruá.



Idade	Unidade Litoestratigráfica		Litologia	Velocidade onda P (m/s)	Resistividade (ohm.m)
Terciária-Quaternária	Grupo Javari	Fm. Solimões	Argilito	1750	40
		Fm. Alter-do-Chão	Arenito	2300	50
Carbonífero Superior – Permiano Inferior	Grupo Tefé	Fm. Fonte Boa (rocha selante)	Siltito	3750/3850	350
		Fm. Carauari (rochas selantes)	Folhelho	5500/5450/5200/5400	
			Calcáreo	5300/5400	
			Anidrita	5600/5200	
	Fm. Juruá (rocha reservatório)	Arenito	4850/4650		
	Magmatismo Penatecaua	Diabásio	5900/6150	450	
Devoniano Médio – Carbonífero Inferior	Grupo Marimari	Fm. Jandiutuba (rocha geradora)	Folhelho	5100	40
Siluriano Superior – Devoniano Inferior		Fm. Jutai	Folhelho	Não ocorrem na Sub-bacia do Juruá	
Ordoviciano Inferior		Fm. Benjamin Constant	Folhelho		
Proterozóico e Arqueano		Embasamento	Cristalino	5250	1500

Figura 2.2: Seção geológica destacando a Província de São Mateus. Modelos: 1) Bifurcado e 2) Saltado. Legenda litoestratigráfica contendo valores para a velocidade da onda P e a resistividade. Fonte: Adaptado de Eiras (1998) e Wanderley Filho et al. (2005).

As trapas são estruturas que as rochas selantes podem apresentar como dobras anticlinais, falhas e fraturas. As feições estruturais mais importantes da Bacia do Solimões são as falhas reversas e as dobras anticlinais formadas durante a tectônica compressiva mesozóica Juruá, porque forma as trapas onde o óleo e os gases estão acumulados atualmente.

O responsável principal pela formação de hidrocarbonetos na Bacia do Solimões foi o magmatismo básico, porque agiu como estufa cozinhando a matéria orgânica, o que propiciou a geração de grande quantidade de óleo e gás na bacia que é imatura para a geração de hidrocarbonetos. A presença de óleo ou gás é, conseqüentemente, função do posicionamento das rochas geradoras e dos reservatórios, dentro ou fora da zona de craqueamento térmico causado pelas soleiras de diabásio: quanto mais profundo estiverem as soleiras e, portanto, mais próximas das rochas geradoras e reservatórios, observa-se a presença de gás; se as soleiras estiverem mais rasas, menor seu efeito térmico sobre o gerador e se observa, então, a presença de óleo.

As soleiras de diabásio presentes na Bacia do Solimões, portanto, se, por um lado, causam grandes problemas para a exploração do petróleo, porque dificultam o imageamento sísmico, por outro, foram responsáveis por toda a geração de hidrocarbonetos na bacia (FILHO, 2006).

3 EXPERIMENTO SÍSMICO

Nazaré (2005) e Nazaré et al. (2005) realizaram um experimento sísmico para o modelo de velocidades mostrado na Figura 3.1, representativo de duas bifurcações de soleira (mais superficialmente na figura 2.2) e de salto de soleira (mais profundamente) presentes na província de Urucu da Bacia do Solimões. Tanto a bifurcação de soleira quanto o salto de soleira são interpretações para a morfologia da soleira da Província de São Mateus (estruturas 1 e 2 da Fig. 2.2) e, portanto, o resultado do experimento sísmico sintético para estruturas encontradas na província de Urucu, detalhado a seguir, é uma boa aproximação da resposta sísmica para São Mateus, província sob estudo.

3.1 MODELAGEM

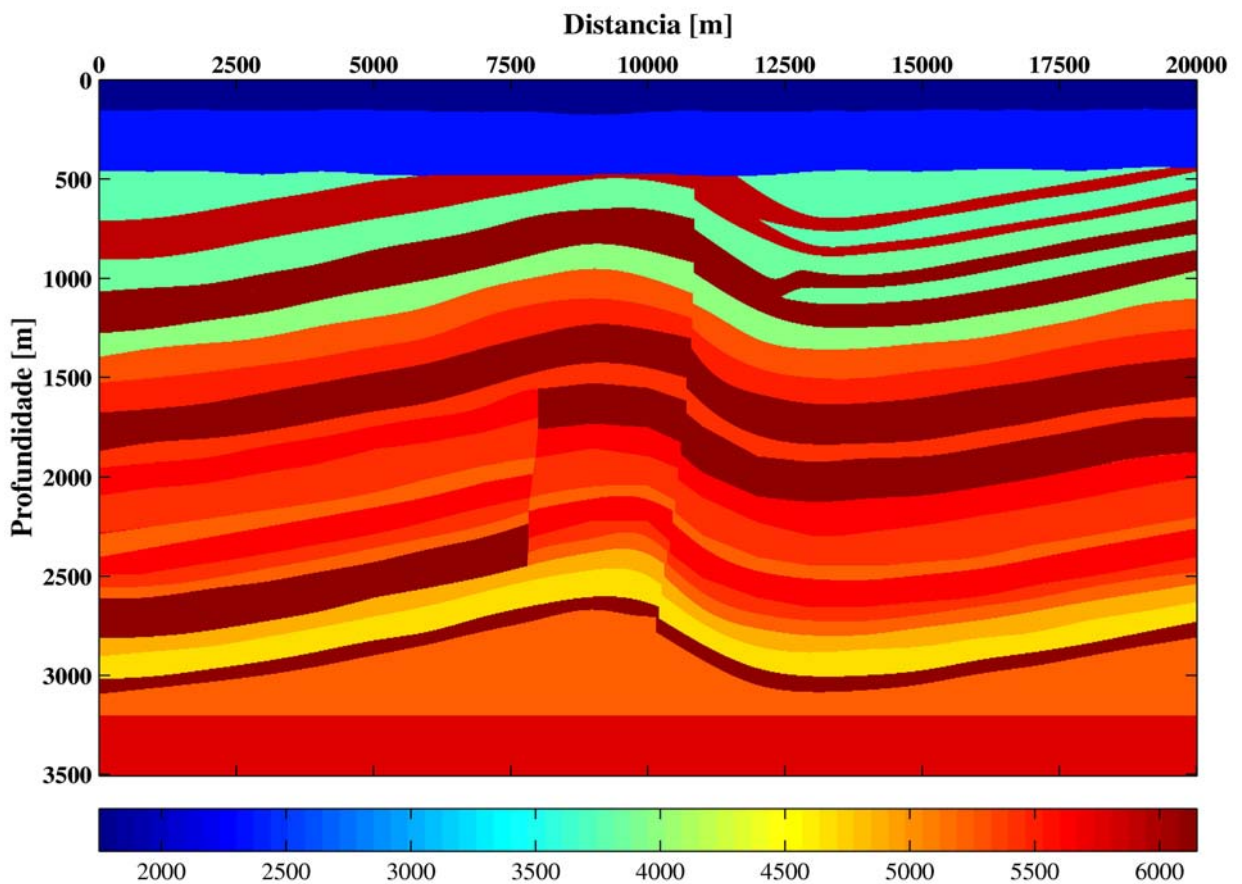


Fig. 3.1: Modelo de Velocidades
Fonte: (NAZARÉ et al, 2005).

3.2 PROCESSAMENTO SÍSMICO

A Figura 3.2 mostra uma seção com afastamento nulo (AN) modelada. A seção foi processada pelo método de empilhamento convencional ponto médio comum (PMC) e pelo método de empilhamento não convencional Superfície de Reflexão Comum (SRC).

O PMC é um método de imageamento para a obtenção de seções AN a partir dos dados sísmicos com múltipla cobertura. Nesse método de empilhamento são utilizadas as velocidades de empilhamento determinadas por meio do processo de análise de velocidade das seções. O empilhamento PMC compreende as correções dinâmicas *normal-moveout* (NMO) e *dip move-out* (DMO). A primeira é aplicada quando a subsuperfície pode ser considerada com uma ou mais camadas planas, homogêneas e sobrepostas. A correção DMO, por sua vez, é usada para meios com refletores inclinados, para reduzir os efeitos dos mergulhos nas velocidades de empilhamento. Após essas correções, os traços sísmicos das seções PMC são somados resultando em um único traço por seção PMC, considerado como o equivalente a um traço com fonte-receptor de afastamento nulo.

Ao contrário do empilhamento PMC, que assume reflexões correspondentes a um único ponto refletor em subsuperfície, o empilhamento SRC admite reflexões associadas com um elemento refletor. Assim, a obtenção da seção AN pelo método de empilhamento CRS consiste no somatório das amplitudes dos traços sísmicos na vizinhança de cada ponto fixo, segundo a superfície de empilhamento CRS. As curvas de empilhamento que descrevem os tempos de reflexão são, também, representadas por uma aproximação hiperbólica. Essas curvas formam a superfície de empilhamento (para cada ponto de amostragem na seção AN a ser simulada) que é definida por três parâmetros cinemáticos das frentes de ondas hipotéticas e a velocidade próxima a esta superfície. Estes parâmetros são: ângulo de emergência do raio central, raio de curvatura da onda do ponto de incidência normal e raio de curvatura da onda normal, determinados de forma totalmente automática por meio de procedimentos de busca, envolvendo análise de coerência aplicada aos dados sísmicos (Garabito et al, 2001). Logo, o SRC não depende, a priori, de um macro modelo de velocidades, pois, uma vez que esses parâmetros são determinados e associados a cada ponto de amostragem, o empilhamento das reflexões sísmicas ao longo das curvas pode ser realizado resultando em uma seção AN (Fig. 3.3).

Como mostra o resultado das investigações de Nazaré (2005) e Nazaré et al. (2005), na seção SRC, a informação é degradada próximo da superfície, mas no restante da seção, a razão sinal ruído é superior em relação à seção obtida com o empilhamento PMC. No entanto, em nenhuma das seções é possível observar logo abaixo das primeiras soleiras, porque a perda de sinal é enorme, o que ilustra essa grave problemática para a prospecção de petróleo.

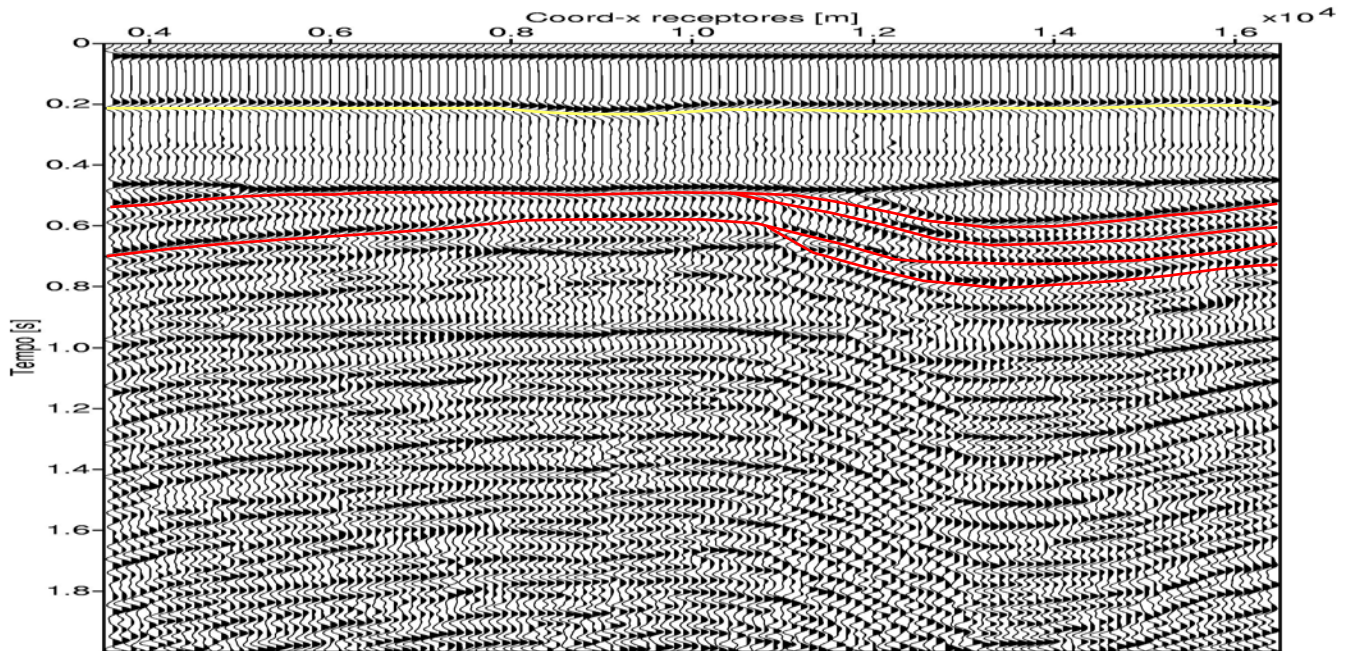


Fig. 3.2: Seção AN modelada com a interpretação das soleiras em linha cheia vermelha
Fonte:(NAZARÉ et al, 2005).

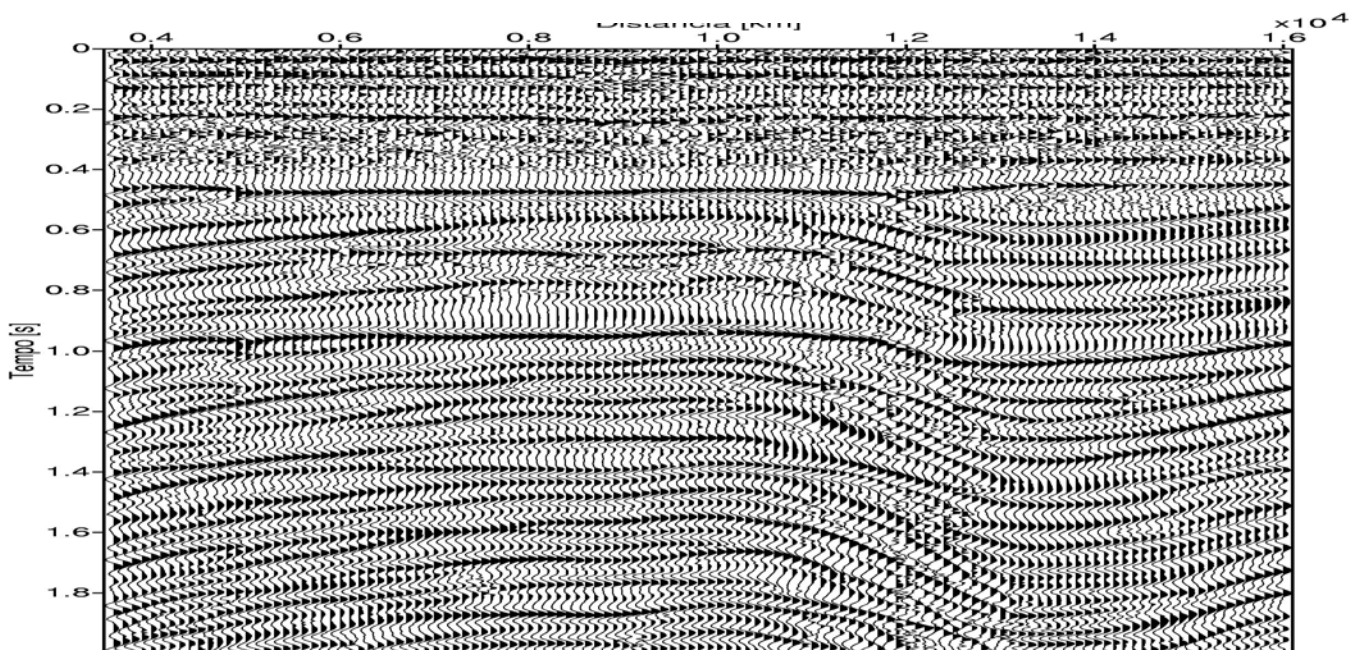


Fig. 3.3: Seção AN obtida com o empilhamento SRC
Fonte:(Nazaré et al 2005).

4 EXPERIMENTO MT

4.1 FUNDAMENTOS MT

O campo magnético causado pelo fluxo variável no tempo de correntes elétricas na ionosfera, provocado especialmente pela atividade solar e descargas elétricas, penetra na terra induzindo na subsuperfície condutiva correntes elétricas. À medida que esse campo EM se propaga para o interior da Terra, ele atravessa regiões que apresentam mudanças de condutividade, ligadas às variações litológicas, mineralógicas, conteúdo de fluido, propriedades dielétricas, permeabilidade magnética, porosidade, salinidade, susceptibilidade magnética e etc. Quando o campo EM encontra limites com diferentes condutividades, campos secundários são gerados e parte deles volta à superfície com informação sobre a mudança relativa de condutividade elétrica em subsuperfície. Os campos primários (campo magnético e campo elétrico telúrico) e aqueles gerados secundariamente sobrepõem-se dando origem aos chamados campos resultantes. Estes últimos podem ser detectados em superfície, permitindo inferir algumas propriedades elétricas da subsuperfície, porque eles detêm informações sobre a subsuperfície contidas nos campos secundários, entre as quais se destaca a distribuição de resistividade (SILVA, 2006).

Os campos incidentes na superfície terrestre correspondem a ondas planas. Apenas uma pequena parte é propagada para o interior da terra, enquanto a maior parte é refletida.

Os campos resultantes são registrados simultaneamente no domínio do tempo e processados no domínio da frequência para obtenção das impedâncias resistivas, porque entre os campos horizontais elétrico e magnético em direções mutuamente ortogonais existe a seguinte relação:

$$E_i(\omega) = Z_{ix}(\omega)H_x(\omega) + Z_{iy}(\omega)H_y(\omega), \quad (4.1)$$

em que E e H são respectivamente os componentes dos campos elétricos e magnéticos, ω é a frequência angular (sendo $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$, com f como a frequência e T denotando o período), x e y . são eixos ortogonais, $i = x$ ou y , e Z são elementos complexos do tensor de impedâncias.

$$\rho_{aij}(\omega) = |Z_{ij}(\omega)|^{2/\omega\mu_0} e \quad (4.2)$$

$$\theta_{ij}(\omega) = \tan^{-1}(imZ_{ij}(\omega)/ReZ_{ij}(\omega)) \quad (4.3)$$

em que ImZ e ReZ são as partes imaginária e real dos elementos complexos do tensor de impedância, μ é a permeabilidade no vácuo e $j = x$ ou y .

A equação linear (4.1) possui duas variáveis. Resolver uma equação para dois parâmetros desconhecidos só é possível quando existem pelo menos dois conjuntos independentes de medidas; daí a necessidade de permanência de cada estação no campo até que eventos de atividade de mesmo período sejam várias vezes registradas.

Os elementos do tensor de impedâncias são utilizados para calcular resistividades aparentes (ρ_a) e fases (θ) nos chamados modos TE (Transversal Elétrico) e TM (Transversal Magnético) através das equações 4.2 e 4.3. No modo TE, $ij = xy$, enquanto no modo TM, $ij = yx$.

Gráficos da variação do log da resistividade aparente e da fase em função do logaritmo do período (ou da frequência) são os principais resultados de uma sondagem MT (SMT). O gráfico $\log \rho_a$ vs $\log T$ assemelha-se à sondagem elétrica vertical (SEV), apenas com um eixo de frequência ao invés de um eixo com a distância entre os eletrodos ($AB/2$).

A resistividade aparente contém informação completa sobre a resistividade da subsuperfície, enquanto a fase, contém informação sobre as variações da resistividade; as anomalias na fase manifestam-se a períodos menores do que as anomalias na resistividade aparente. O modo TM é mais sensível a estruturas resistivas (SILVA, 2006).

A amplitude da onda eletromagnética decai à medida que ela se difunde através da Terra em função da frequência da onda e da condutividade em subsuperfície. Essa condição é expressa através da profundidade pelicular δ ("skin depth"):

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 503 \sqrt{\rho T}, \quad (4.4)$$

em que ρ é a resistividade do meio onde a onda se propaga, que corresponde ao inverso da condutividade, e μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo.

A penetração é, portanto, tanto maior quanto maior for o período e a resistividade.

4.2 MODELAGEM

O problema direto corresponde ao estudo do efeito produzido por uma causa conhecida. Em Geofísica, isso equivale ao cálculo da resposta de uma determinada

distribuição de propriedade física conhecida. Frequentemente, esse cálculo é referido como modelagem direta. A resposta calculada, por sua vez, como é uma simulação das medidas tomadas no campo, é chamada de dados (ou medidas) sintéticos.

Primeiro, é necessário construir o modelo interpretativo do problema direto. O modelo interpretativo neste trabalho consiste de uma malha de blocos (ou células) justaposta. A propriedade física de cada bloco é constante, mas como ela varia de bloco para bloco, permite representar distribuições de propriedade de geometrias arbitrárias. A Figura 4.1(a) mostra um corpo homogêneo 2D com uma secção arbitrária S , representativo de uma soleira de diabásio dentro de um pacote de sedimentos. A superfície da terra define o plano xy do sistema de coordenadas cartesianas, com o eixo Z dirigido para baixo (sistema de coordenadas destrá). Este modelo interpretativo permite que a superfície S seja aproximada por um polígono definido pelo contorno externo de M blocos retangulares, justapostos, 2D, como mostrado na Figura 4.1(b).

Como o problema MT é não linear, o problema direto pode ser escrito como:

$$f(x_i, y_i, z_i, t_i, \mathbf{p}) = d(x_i, y_i, z_i, t_i), \quad i = 1, 2, N, \quad (4.5)$$

em que f é o funcional geofísico que associa um vetor \mathbf{p} $M \times 1$ de parâmetros do modelo interpretativo (resistividades de cada célula) a cada uma das N observações d (resistividade aparente ou fase nos modos TE ou TM) realizadas nas posições (x_i, y_i, z_i) com o período t_i .

O problema direto consiste em: dado \mathbf{p} obter \mathbf{d} , o vetor N -dimensional cujo i -

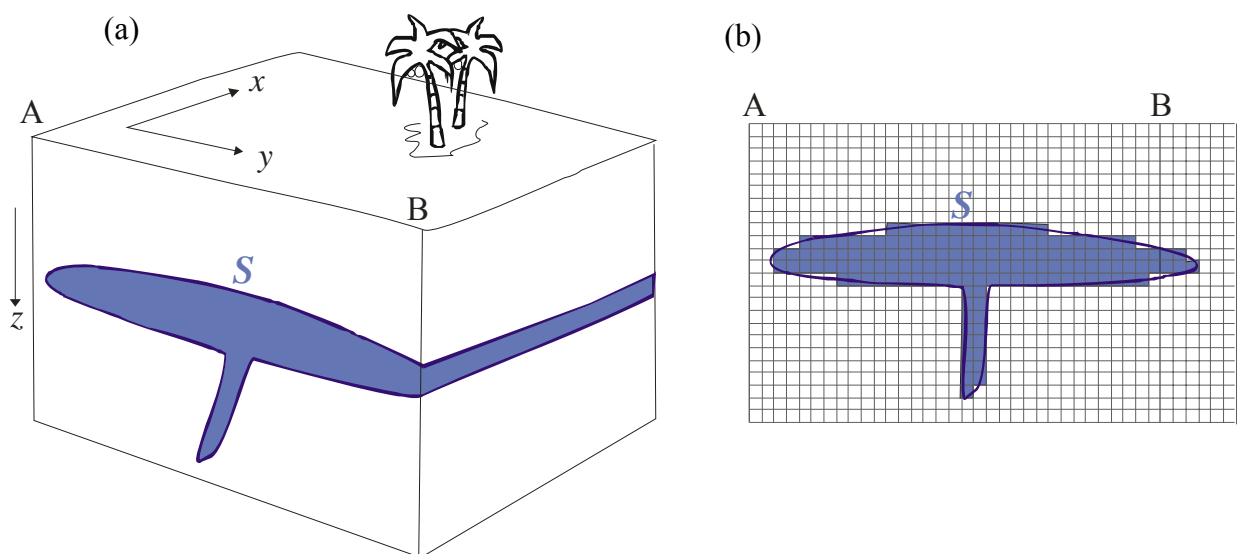


Fig. 4.1: (a) Bloco diagrama mostrando uma soleira de diabásio (em azul). (b) Modelo interpretativo. A e B são posições do perfil y nas bordas do bloco diagrama. S é a secção da soleira. Sistema de coordenadas cartesianas destrá.

Fonte:Silva (2006).

ésimo elemento é $f(x_i, y_i, z_i, t_i, p)$, ou seja, uma vez assinalados aos M blocos valores de resistividade, calcular o valor da resistividade aparente e da fase para os modos TE e TM através da impedância em estações ao longo de y para períodos pré-selecionados (SILVA, 2006).

Neste trabalho, para resolver o problema direto foi usada uma versão aprimorada do programa de elementos finitos baseado em Rijo (1977).

Em 2007, durante estágio na Petrobras na cidade de Manaus na UNBSOL, obtive uma gama de conhecimentos geofísicos e geológicos que facilitaram a construção de modelos físicos referentes aos modelos geológicos 1 e 2 da Figura 2.2, para a modelagem MT. Como esses modelos se encontram entre os poços STM1 e STM2 foram, também, consultados dados desses poços.

A seção geológica entre os poços STM1 E STM2 foi redesenhada fidedignamente, igualando-se as escalas horizontais e verticais. A seguir, a seção foi discretizada, resultando em uma malha de 200 m x 200 m com 64 células na horizontal e 32 na vertical (12800 m de comprimento e 6400 m de profundidade). Em cada nó da malha foi amarrado uma estação chegando ao total de 30 estações e utilizado o intervalo de frequência de 1s a 0.0002s do espectro eletromagnético. 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.

Os dois modelos construídos, um modelo com a bifurcação de soleira de diabásio e o outro com o salto de soleira (estruturas 1 e 2 da Fig. 2.2., respectivamente) são apresentados na Figura 4.2. O primeiro modelo adotado para a área, que se caracteriza pela falta de informação sísmica, foi o modelo bifurcado.

Ambos os modelos contém 10 camadas, com 5 litologias com diferentes valores de resistividade, como é mostrado na Figura 4.2.

4.2.1 **Efeito da resistividade das soleiras**

Primeiramente, a seqüência evaporítica presente na seção foi colocada na posição ocupada pelo diabásio no modelo saltado, considerando-se para a mesma a resistividade de 350 ohm.m, o que forneceu os dados sintéticos mostrados na Figura 4.3. Em seguida, foi introduzido o diabásio de 450 ohm.m, produzindo os resultados apresentados na Figura 4.4. Em outras palavras: o experimento considerou primeiramente a seção sem o diabásio e, depois, com o mesmo.

O valor da resistividade da seqüência evaporítica foi, então, reduzido para 130 ohm.m e feita a modelagem com o evaporito ocupando a posição do diabásio no modelo

saltado, o que propiciou a obtenção dos dados mostrados na Figura 4.5. Para efeito de comparação dos resultados foi, então, introduzida a soleira de diabásio de 450 ohm.m, fornecendo as seções da Figura 4.6.

Finalmente, foi feita nova modelagem com os evaporitos com 50 ohm.m na posição do diabásio e, em seguida, com a presença do diabásio de 450 ohm.m, o que gerou os resultados observados nas Figuras 4.7 e 4.8, respectivamente.

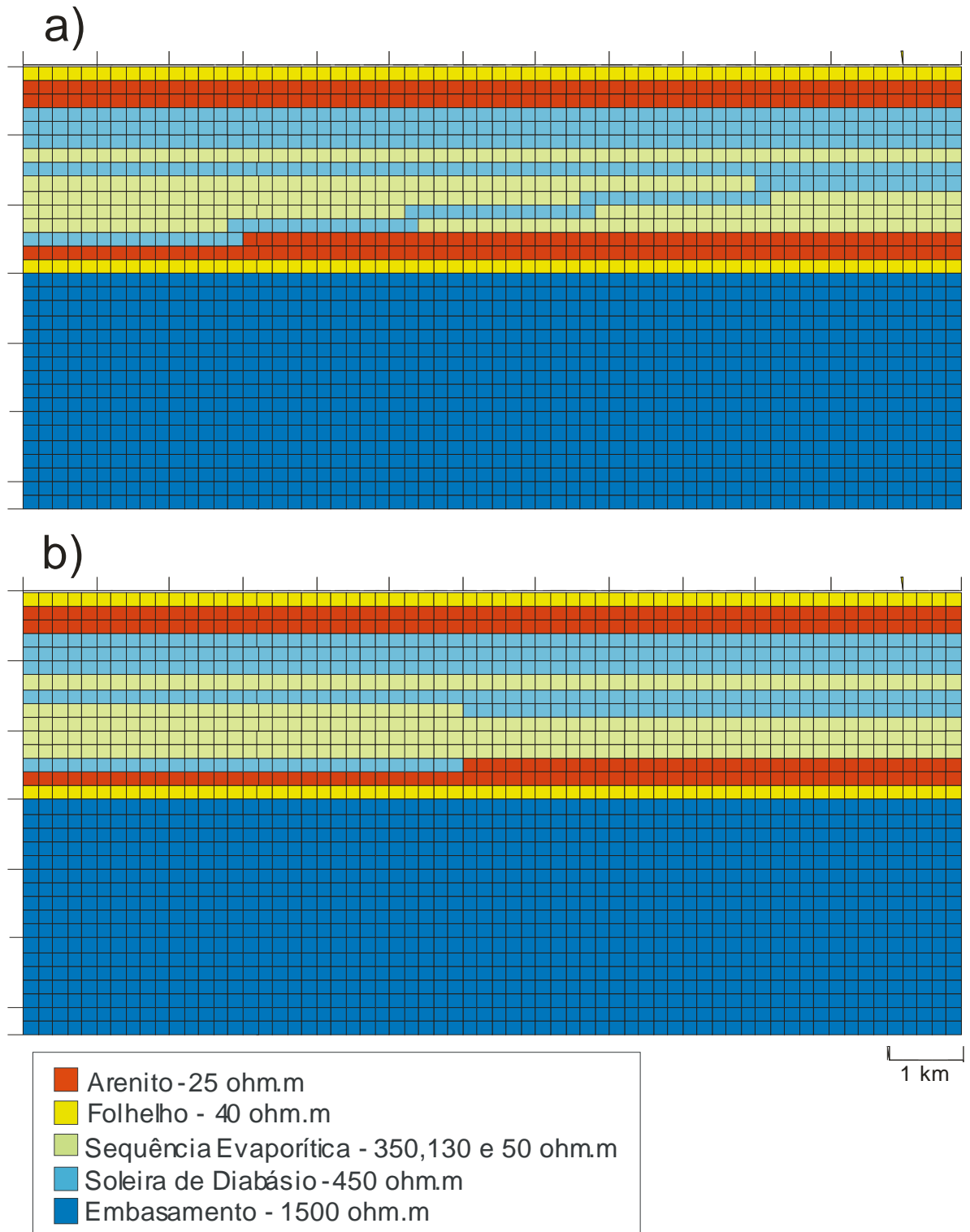


Fig.4.2: Modelo de resistividade para Soleira de diabásio: a)Bifurcação. b)Salto.

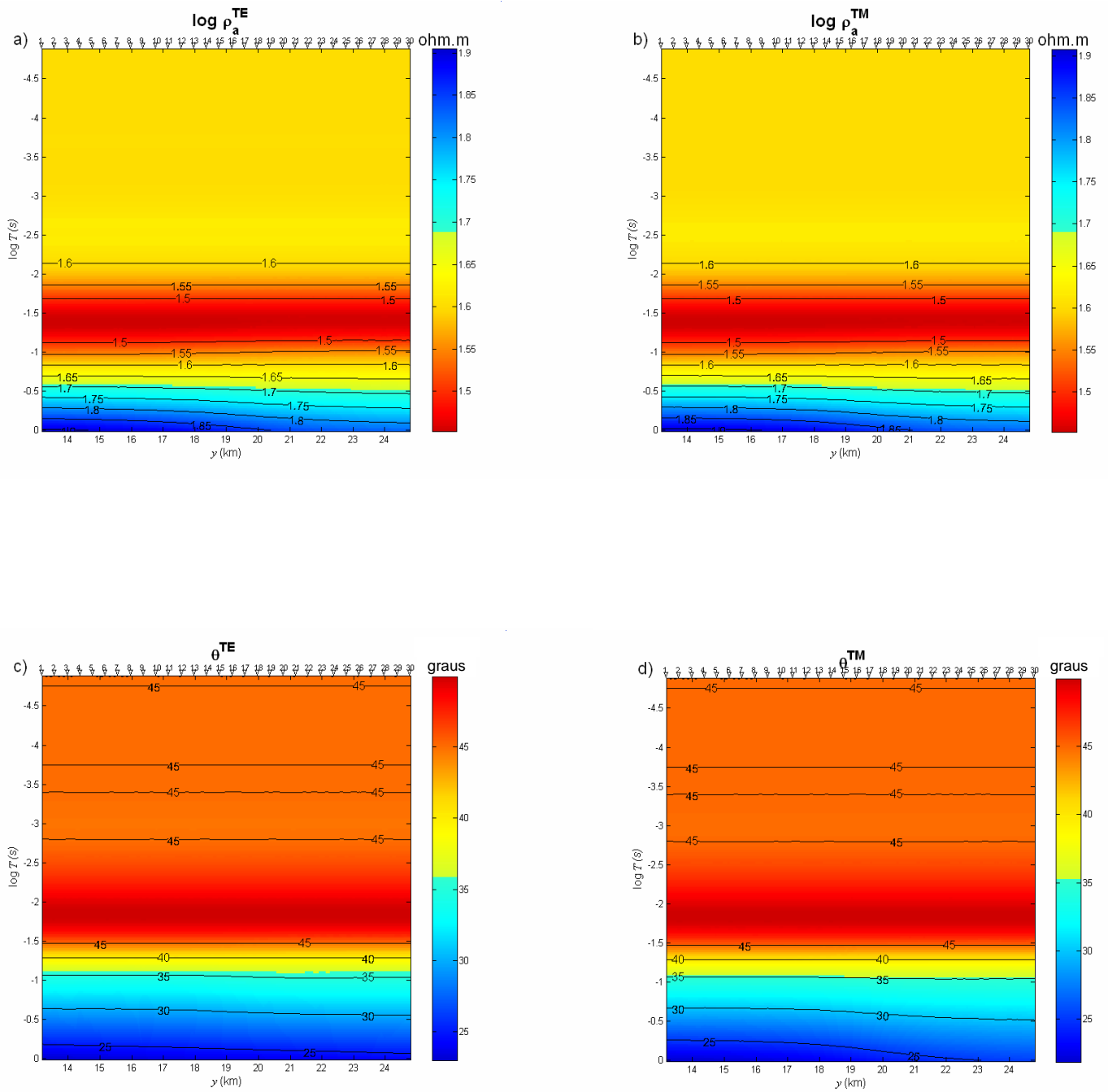


Fig. 4.3: Modelo saltado sem a soleira (seqüência evaporítica com resistividade de 350 ohm.m no lugar do diabásio). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

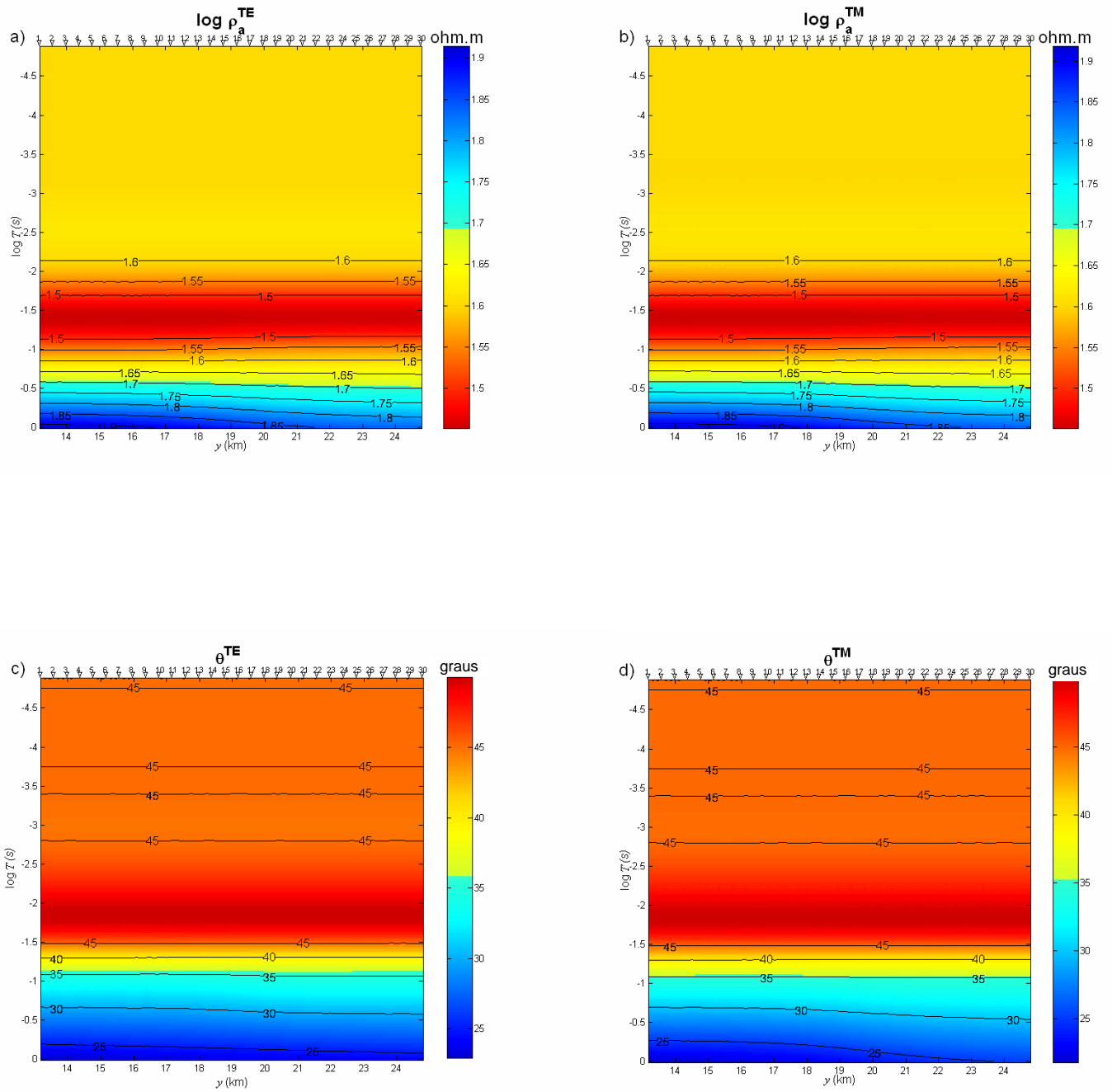


Fig 4.4: Modelo saltado com soleira (Soleira com 450 ohm.m, seqüência evaporítica com resistividade de 350 ohm.m. Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

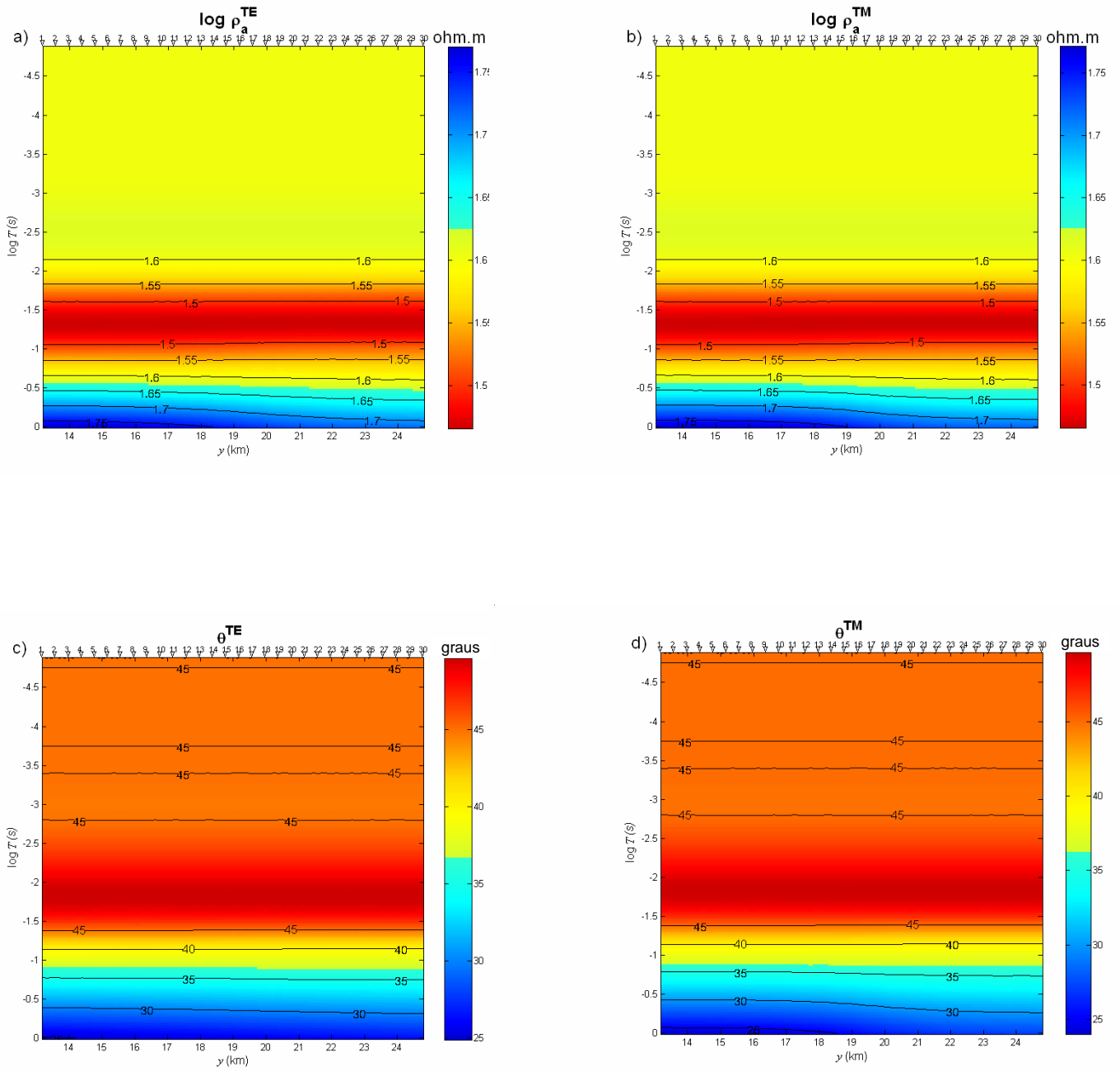


Fig. 4.5: Modelo saltado sem a soleira (seqüência evaporítica com resistividade de 130 ohm.m no lugar do diabásio. Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

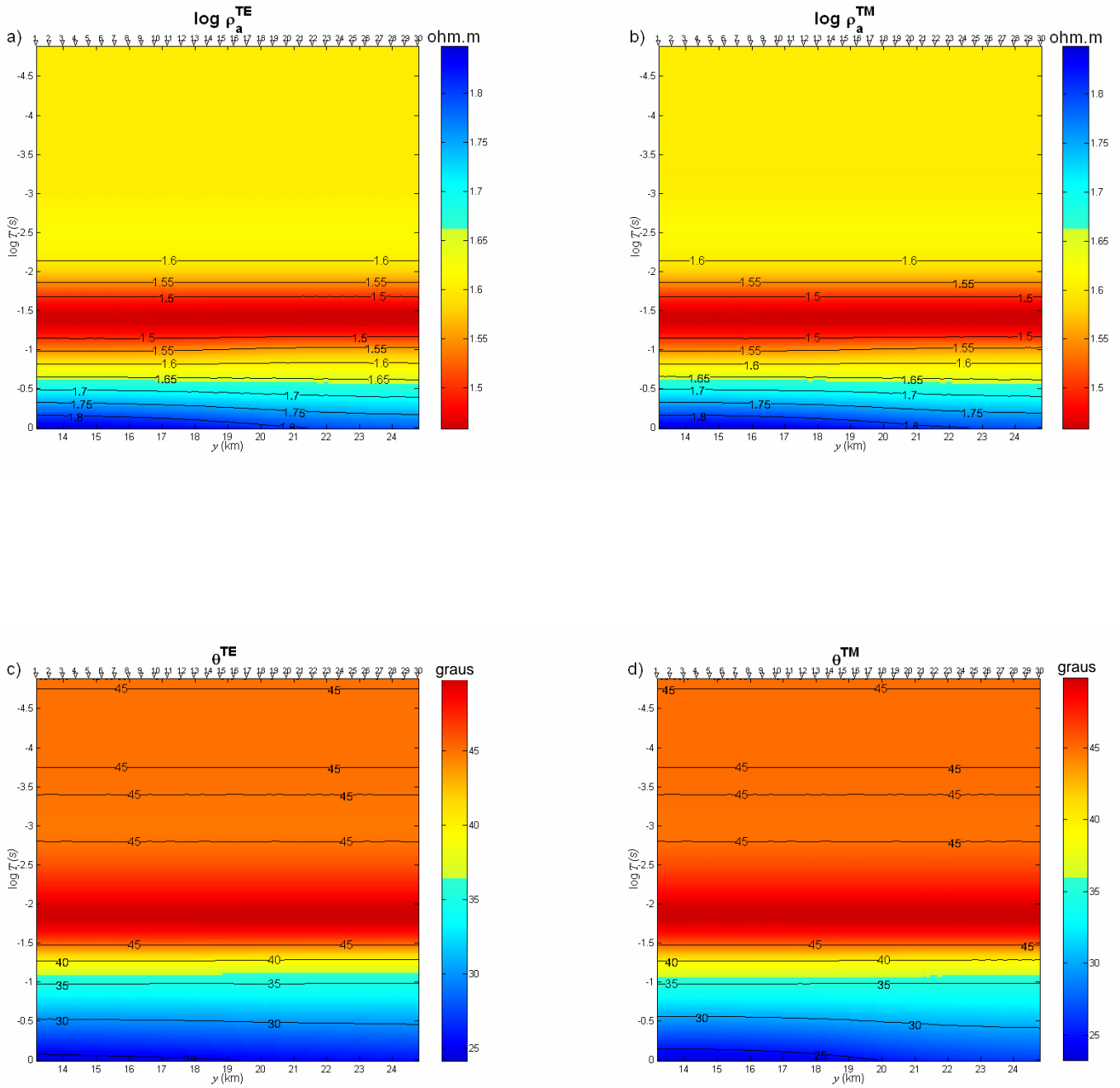


Fig. 4.6: Modelo saltado com soleira (Soleira com 450 ohm.m, seqüência evaporítica com resistividade de 130 ohm.m. Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

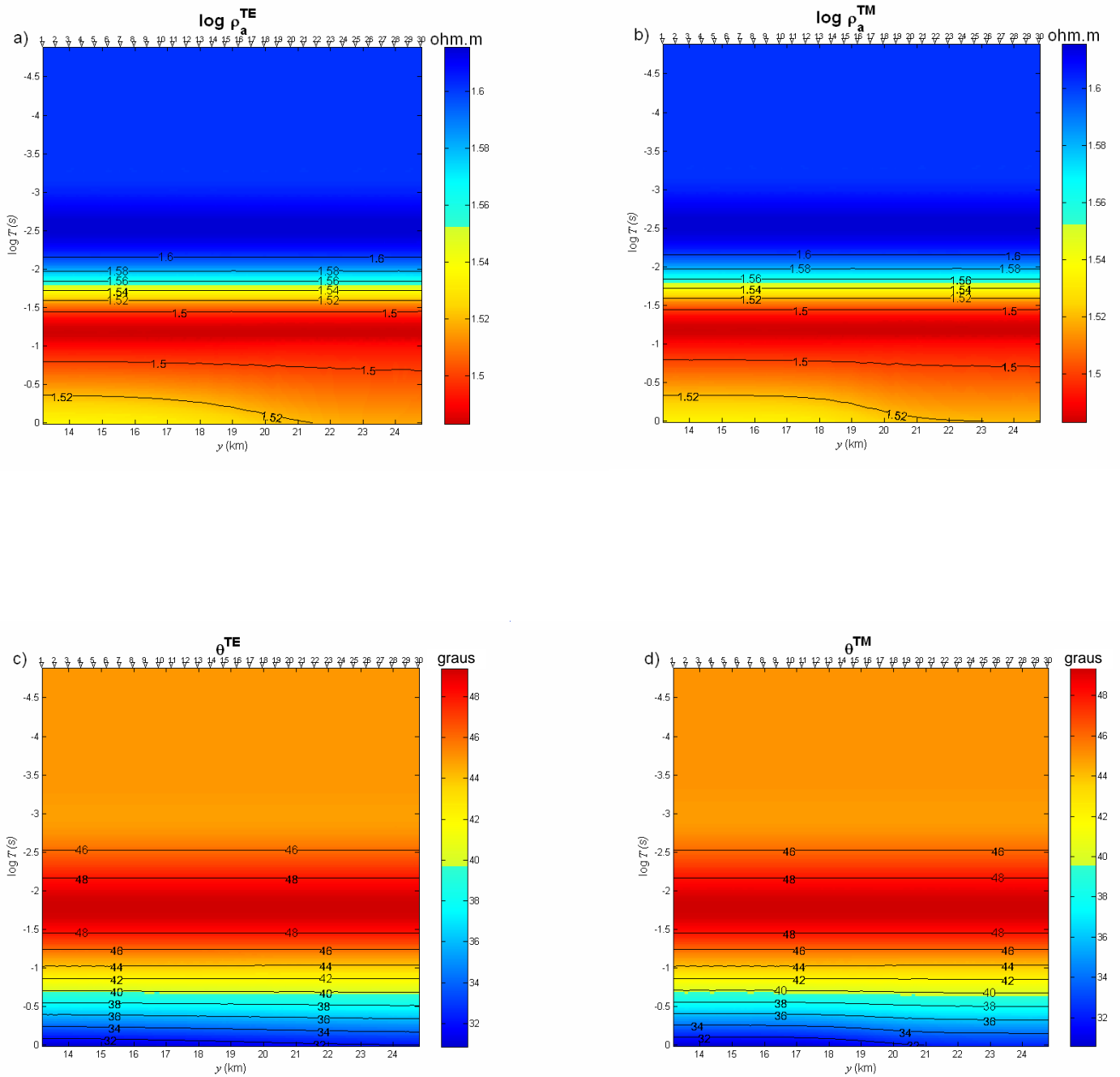


Fig. 4.7: Modelo saltado sem a soleira (seqüência evaporítica com resistividade de 50 ohm.m no lugar do diabásio). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

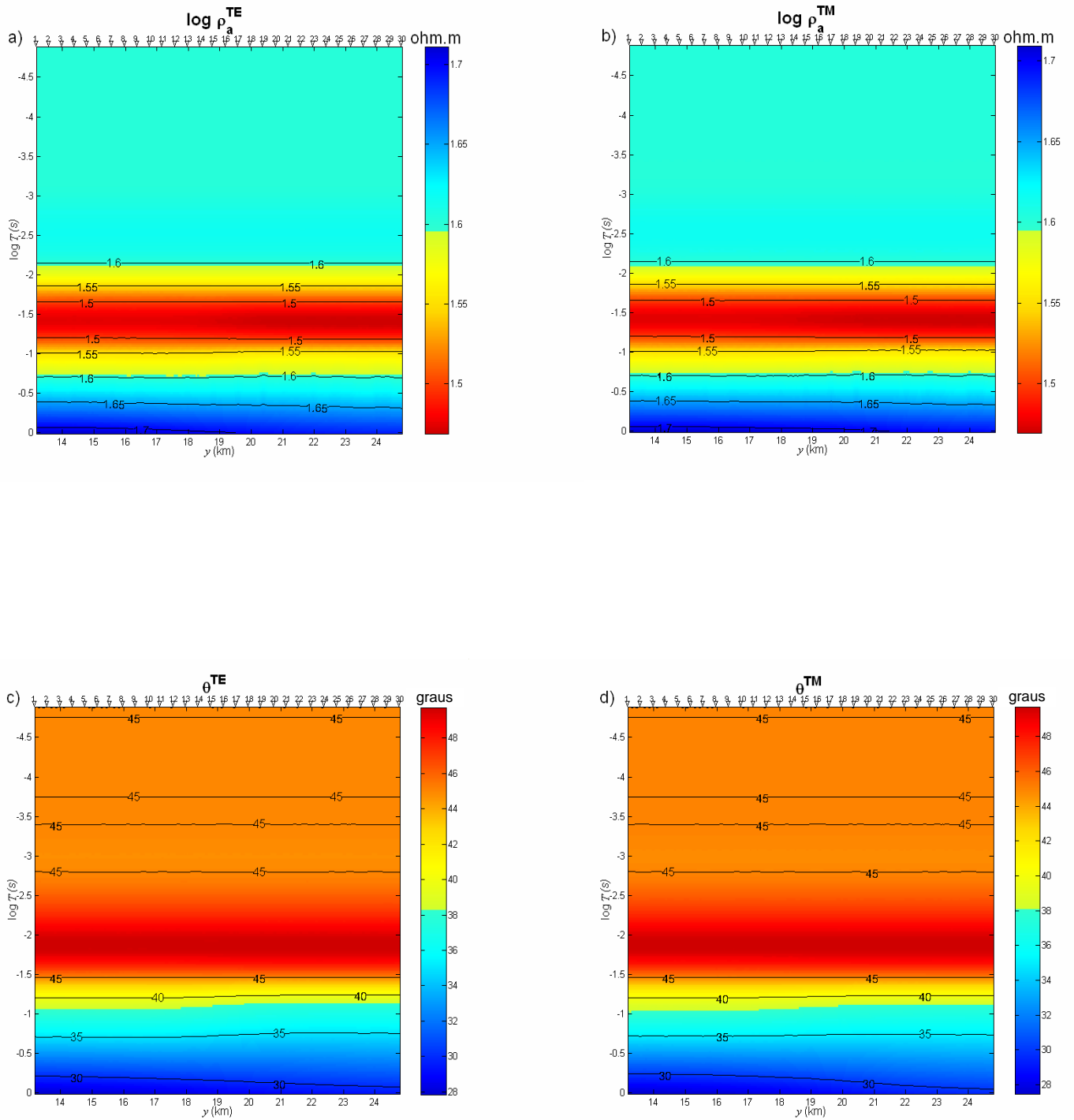


Fig. 4.8: Modelo saltado com soleira (Soleira com 450 ohm.m, seqüência evaporítica com resistividade de 50 ohm.m. Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

Nas pseudo-seções obtidas com a diminuição da resistividade do evaporito e sem a soleira (Figs. 4.3, 4.5 e 4.7), 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 (Figs. 4.4, 4.6 e 4.8), mas as respostas TE e TM são algo diferentes, indicando que o modelo afasta-se ligeiramente do unidimensional.

A diferença entre os resultados obtidos sem a soleira e com a soleira é quase imperceptível quando usada a seqüência evaporítica com 350 ohm.m (Figs. 4.3 e 4.4, respectivamente), torna-se mais perceptível quando usada a seqüência evaporítica com 130 ohm.m (Figs. 4.5 e 4.6) e, finalmente, é bastante visível nos resultados obtidos com os evaporitos com 50 ohm.m (Fig. 4.7 e 4.8), como não podia deixar de ser, já que cresce nessa ordem o contraste entre evaporitos e basalto. Observa-se com o aumento do contraste na resistividade, portanto, que a resistividade aparente cresce enquanto a fase reduz para os maiores períodos (porção inferior das pseudo-seções).

Isso decore do fato que os evaporitos mais condutivos permitem maior absorção da onda eletromagnética, blindando a penetração do campo e, portanto, reduzem 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 a presença do diabásio fica mais fácil definir o relevo do embasamento.

Nos modos TE e TM as respostas são quase as mesmas porque o modelo continua tendendo ao unidimensional.

Para uma nova comparação de resultados, foi colocado na posição ocupada pelo diabásio no modelo saltado, um arenito de 25 ohm.m considerando-se para a seqüência evaporítica a resistividade de 350, 130 e, finalmente, 50 ohm.m, o que forneceu os dados sintéticos mostrados nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11, respectivamente.

As Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 mostram que o arenito com valor de 25 ohm.m no lugar do diabásio não permite observar a resposta para o embasamento. A comparação do conjunto de figuras 4.3-4.4-4.9, 4.5-4.6-4.10 e 4.7-4.8-4.11 evidencia que a presença do diabásio, por ser uma rocha resistiva, permite uma maior profundidade de penetração (skin depth).

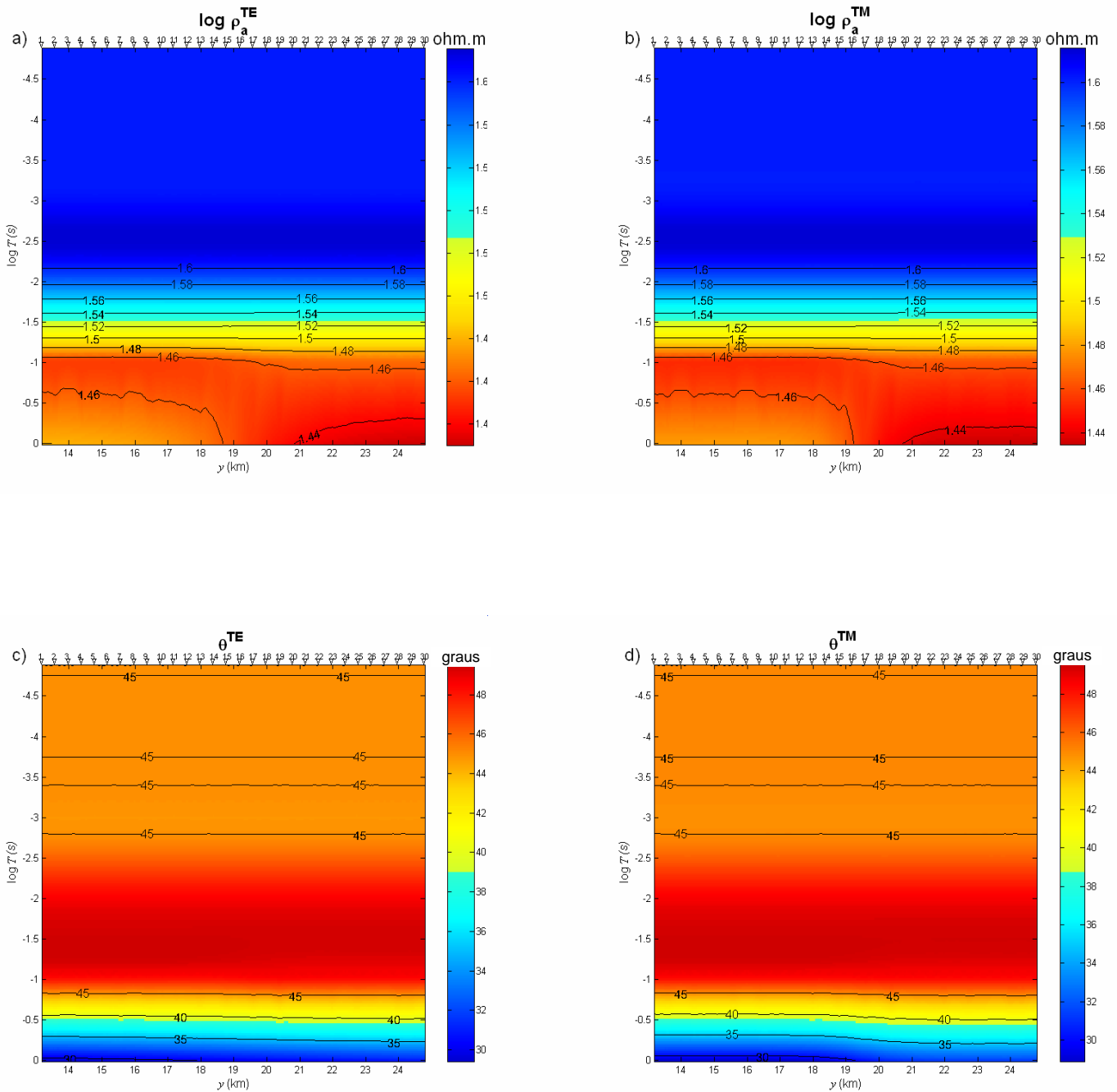


Fig. 4.9: Modelo saltado sem a soleira (seqüência evaporítica com 350 ohm.m e arenito com 25 ohm.m no lugar do diabásio). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM

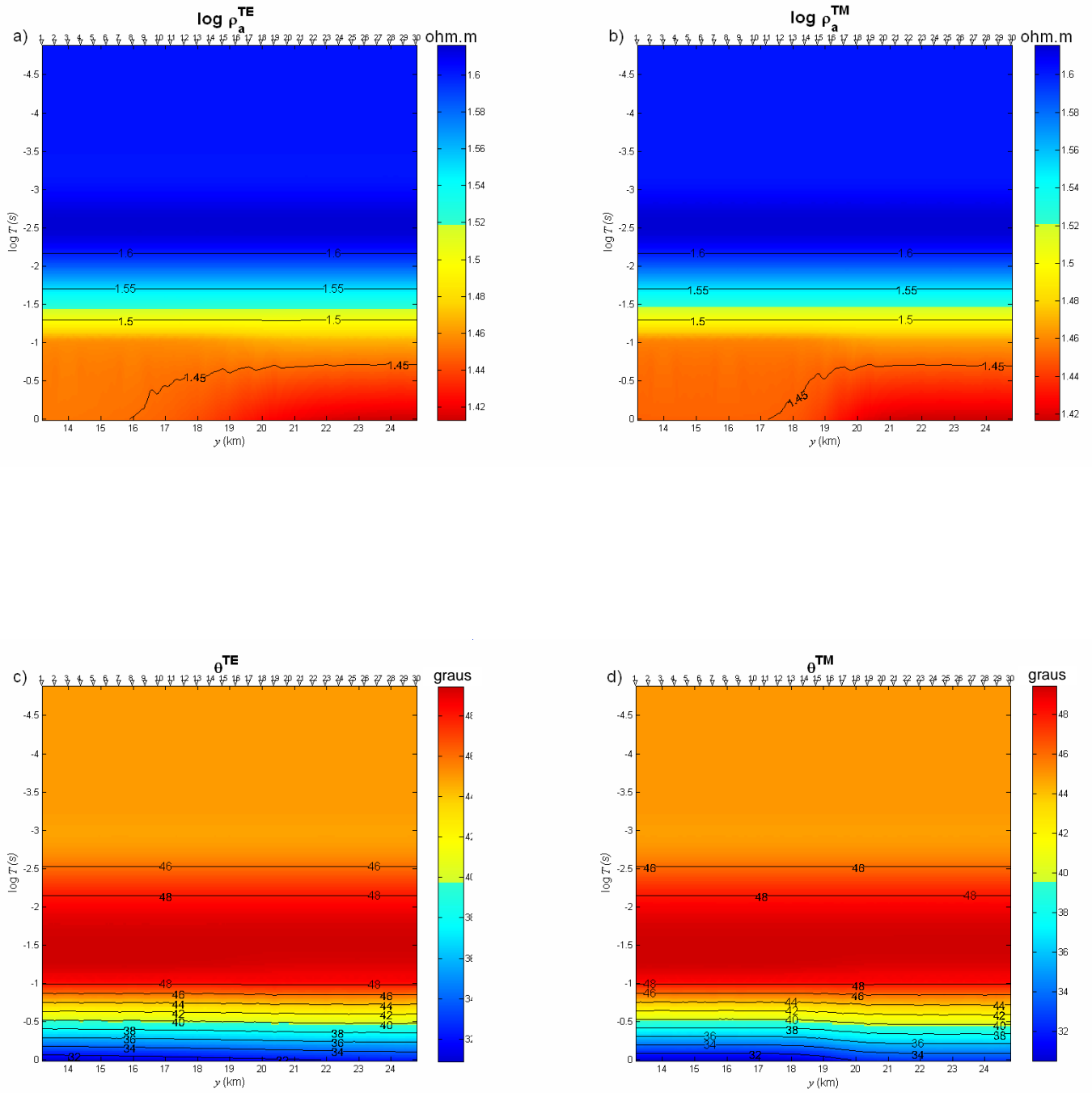


Fig. 4.10: Modelo saltado sem a soleira (seqüência evaporítica com resistividade de 130 ohm.m e arenito com 25ohm.m no lugar do diabásio). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

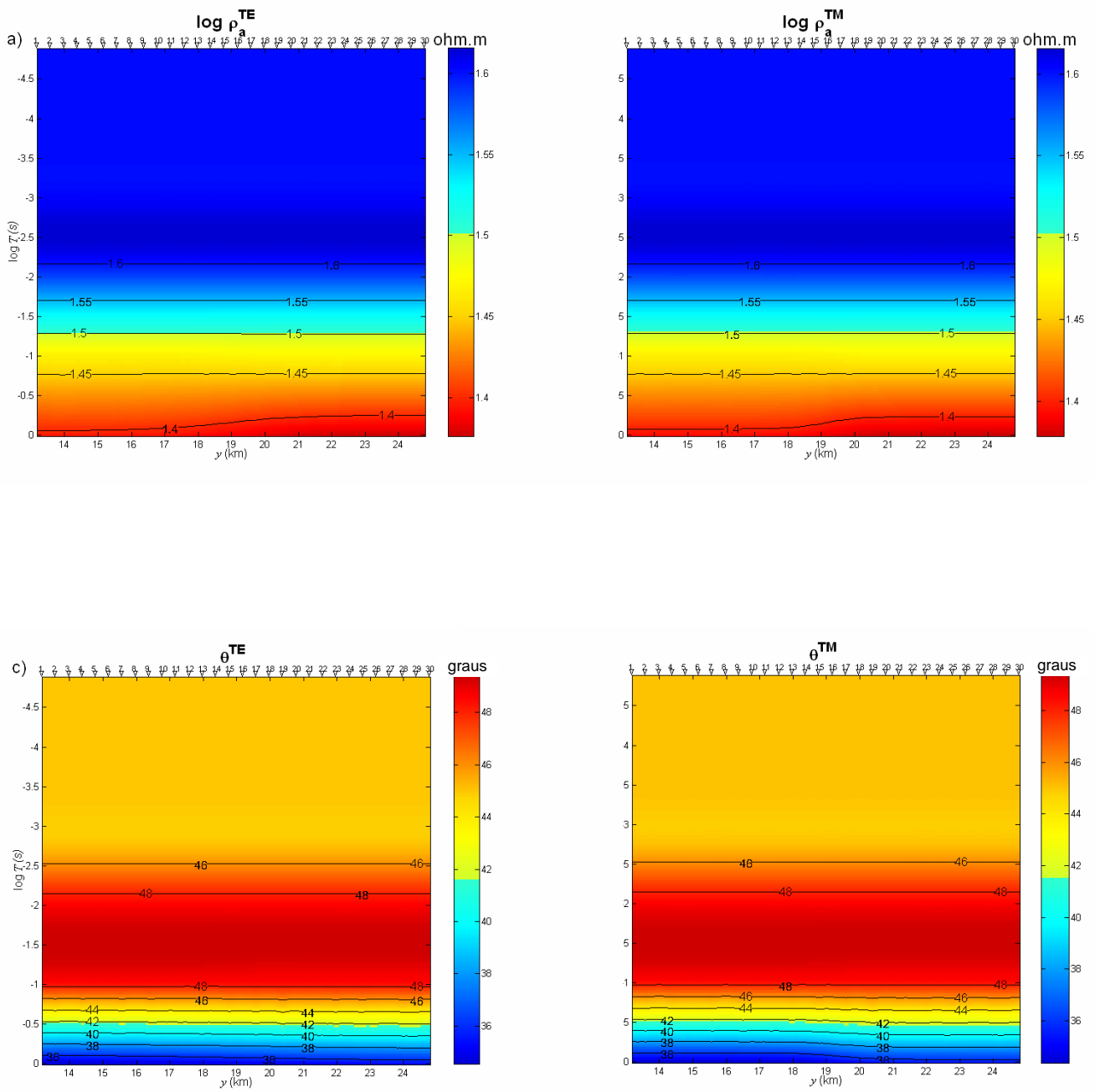


Fig. 4.11: Modelo saltado sem a soleira (seqüência evaporítica com resistividade de 50 ohm.m e arenito com 25 ohm.m no lugar do diabásio). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

Finalmente, os experimentos mostrados nas Figuras 4.3 a 4.8 foram repetidos para o modelo bifurcado, fornecendo as Figuras 4.12 a 4.17, na ordem.

Como esperado, as conclusões evidenciadas no experimento com o modelo saltado podem ser adotadas para as modelagens com o modelo bifurcado, apenas com pequenas variações nas linhas de isovalores. No entanto, o que aqui deve ser destacado é que esses modelos respondem diferentemente, o que aponta para a possibilidade da distinção entre os dois modelos por meio da interpretação pelo método direto e, talvez, inversão dos dados.

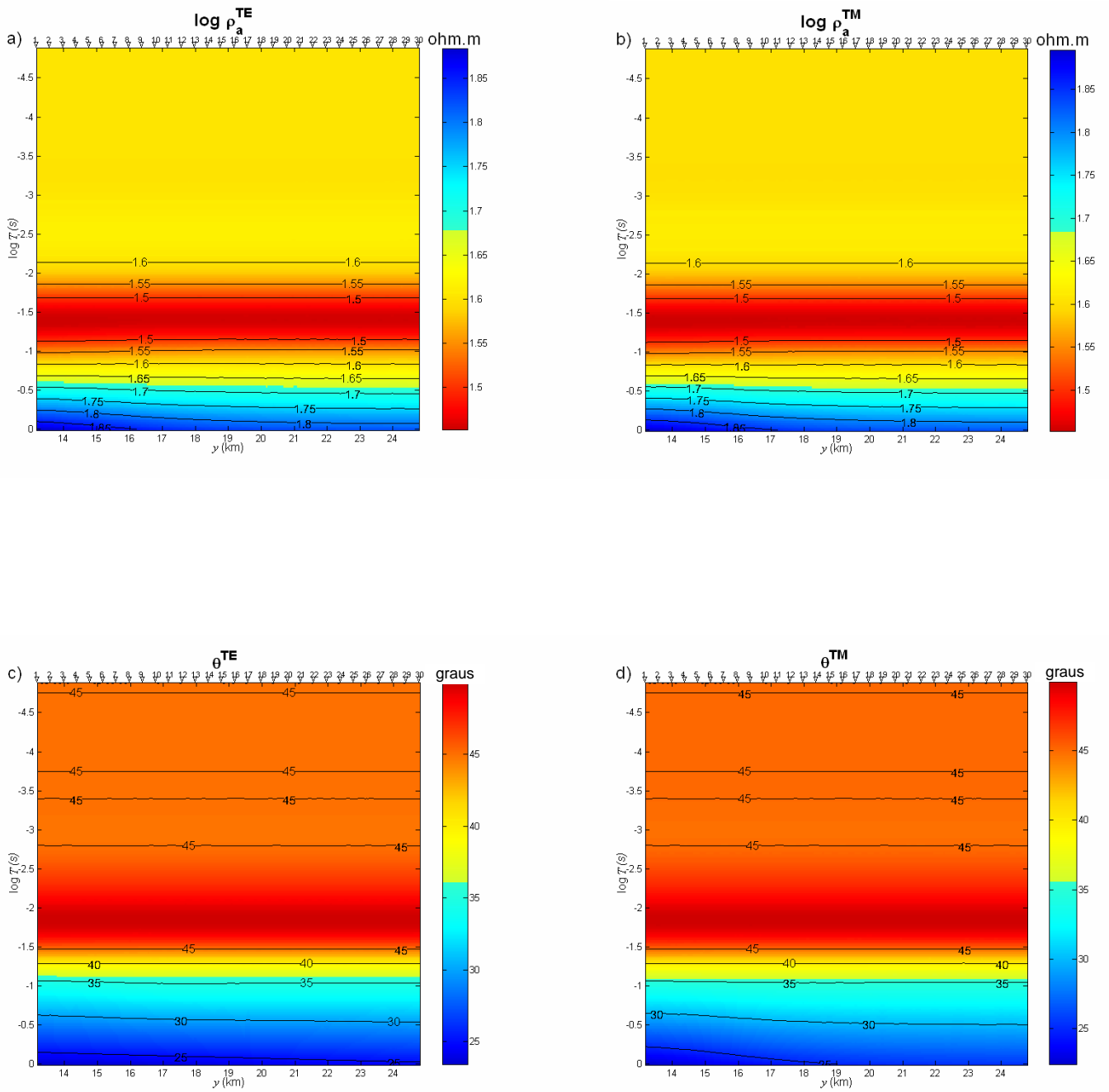


Fig. 4.12: Modelo bifurcado sem a soleira (seqüência evaporítica com resistividade de 350 ohm.m no lugar do diabásio). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

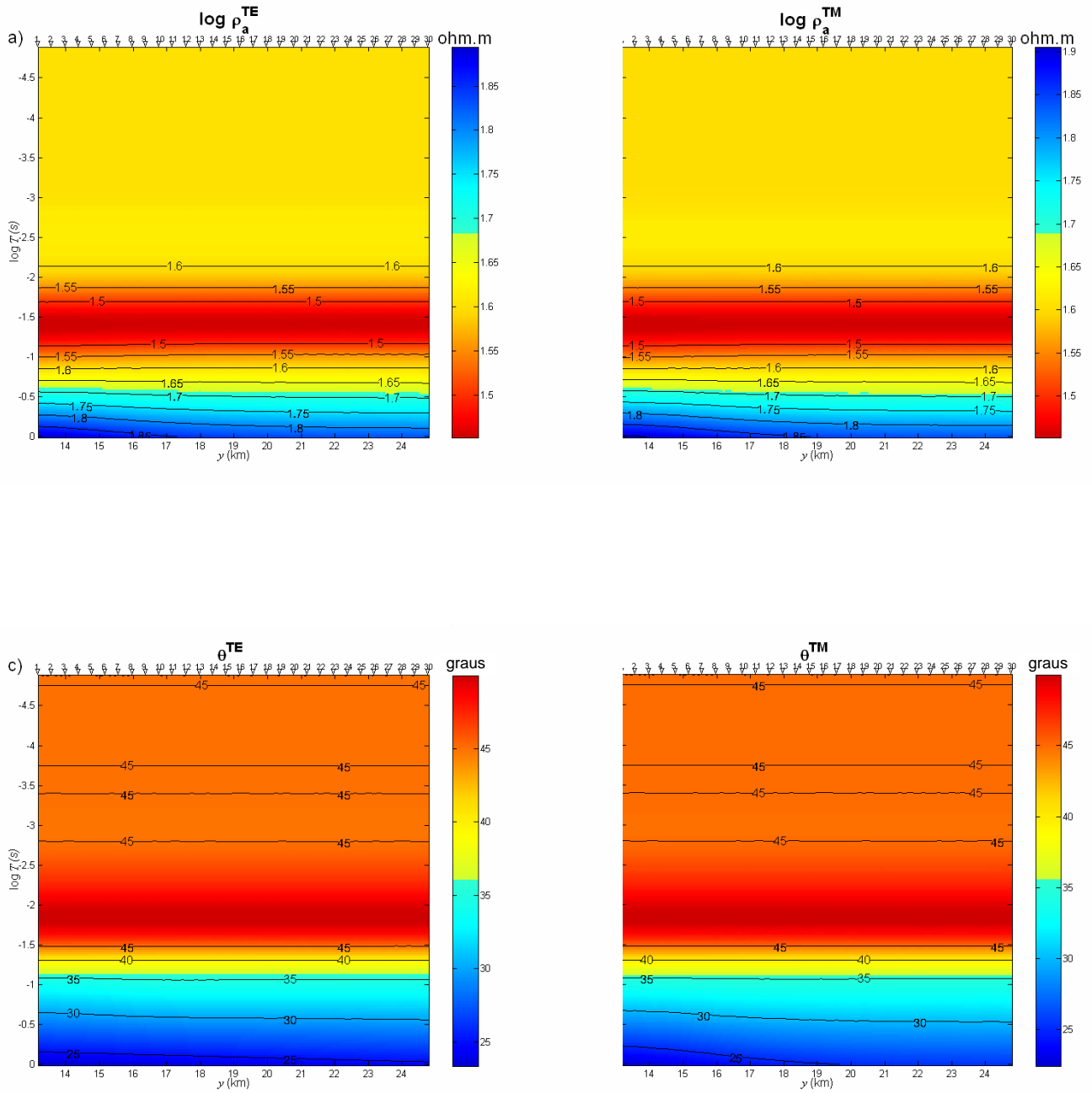


Fig. 4.13: Modelo bifurcado com soleira (Soleira com 450 ohm.m, seqüência evaporítica com resistividade de 350 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

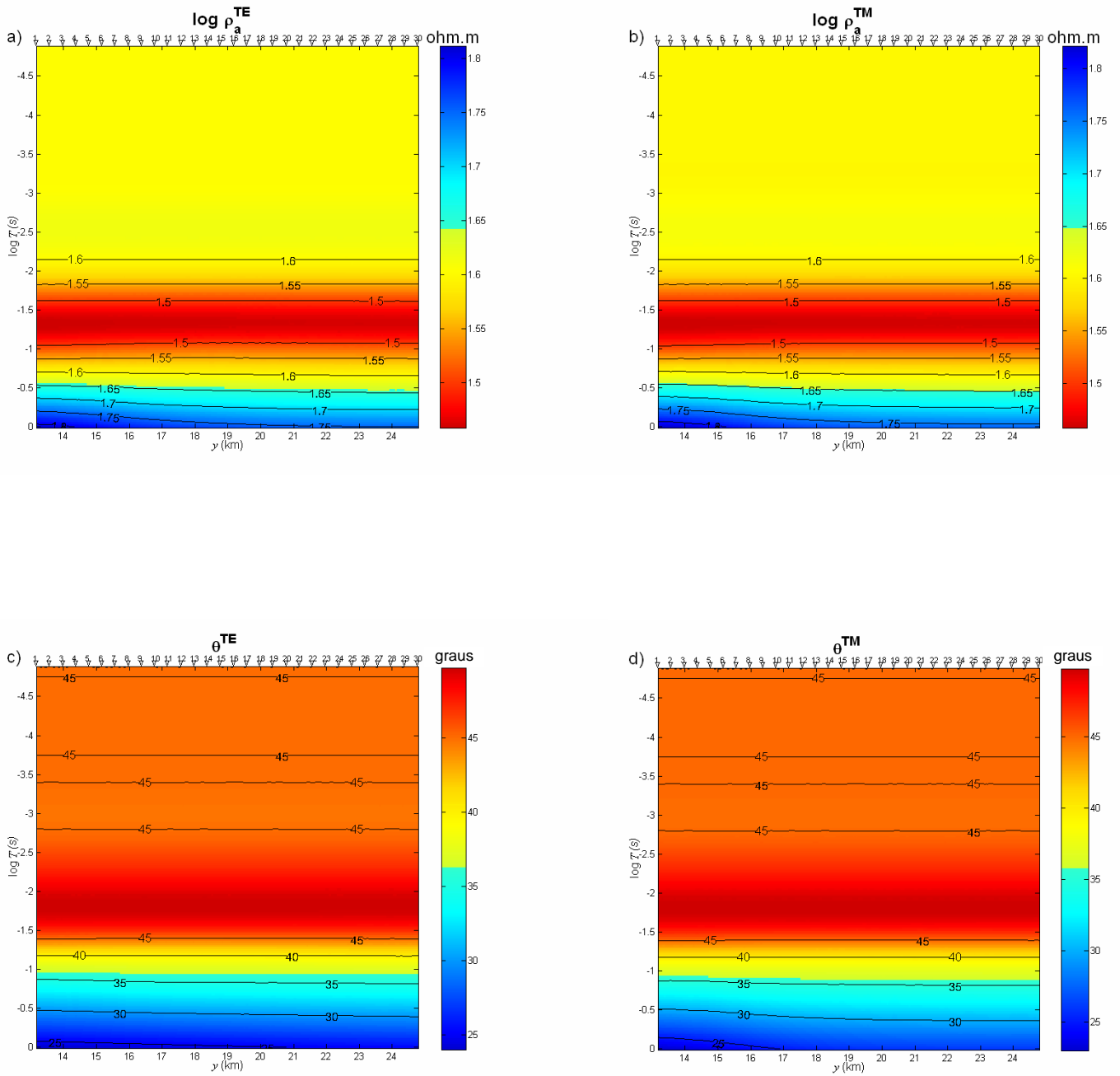


Fig. 4.14: Modelo bifurcado sem a soleira (seqüência evaporítica com resistividade de 130 ohm.m no lugar do diabásio). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

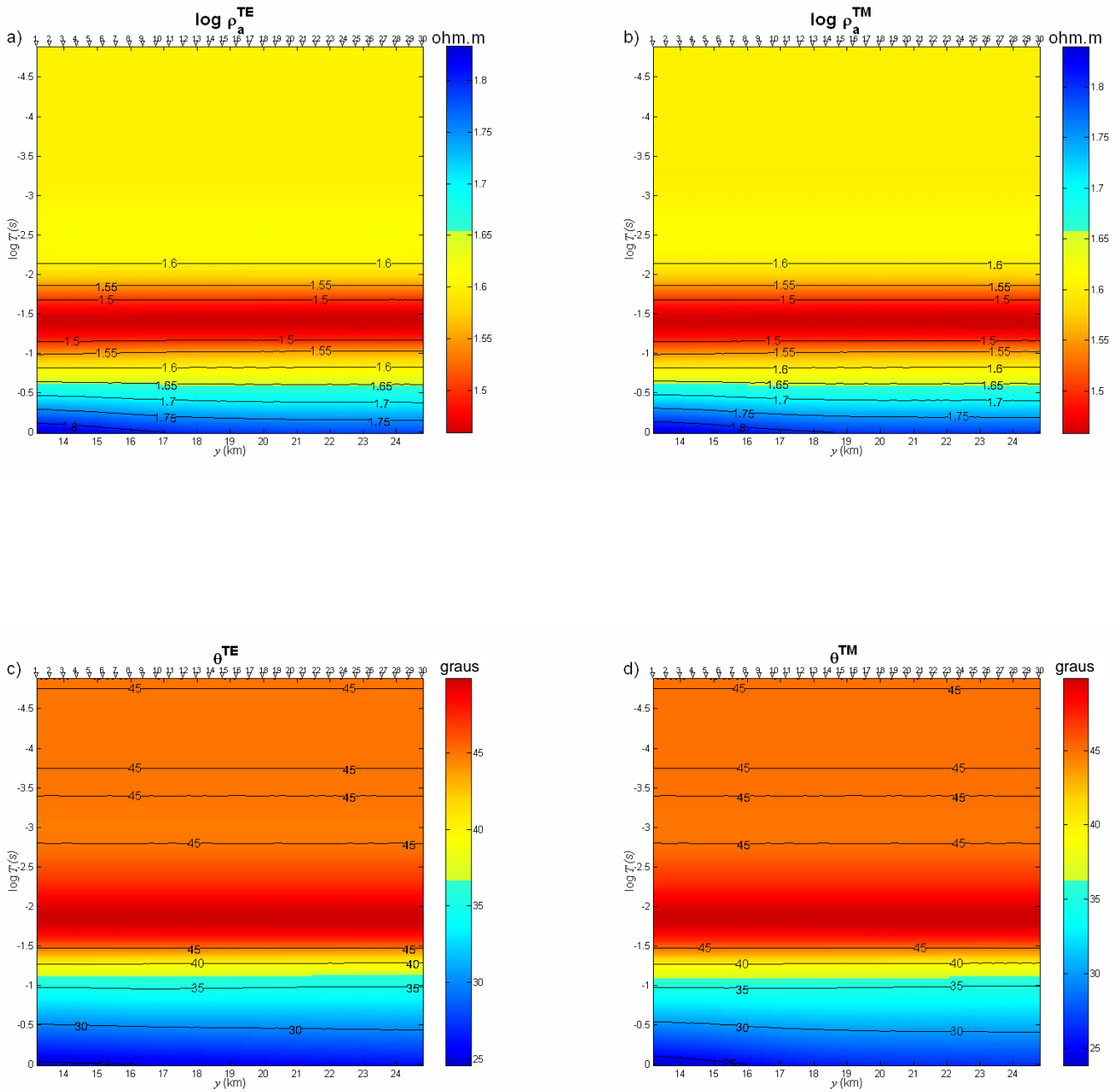


Fig. 4.15: Modelo bifurcado com soleira (Soleira com 450 ohm.m, seqüência evaporítica com resistividade de 130 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

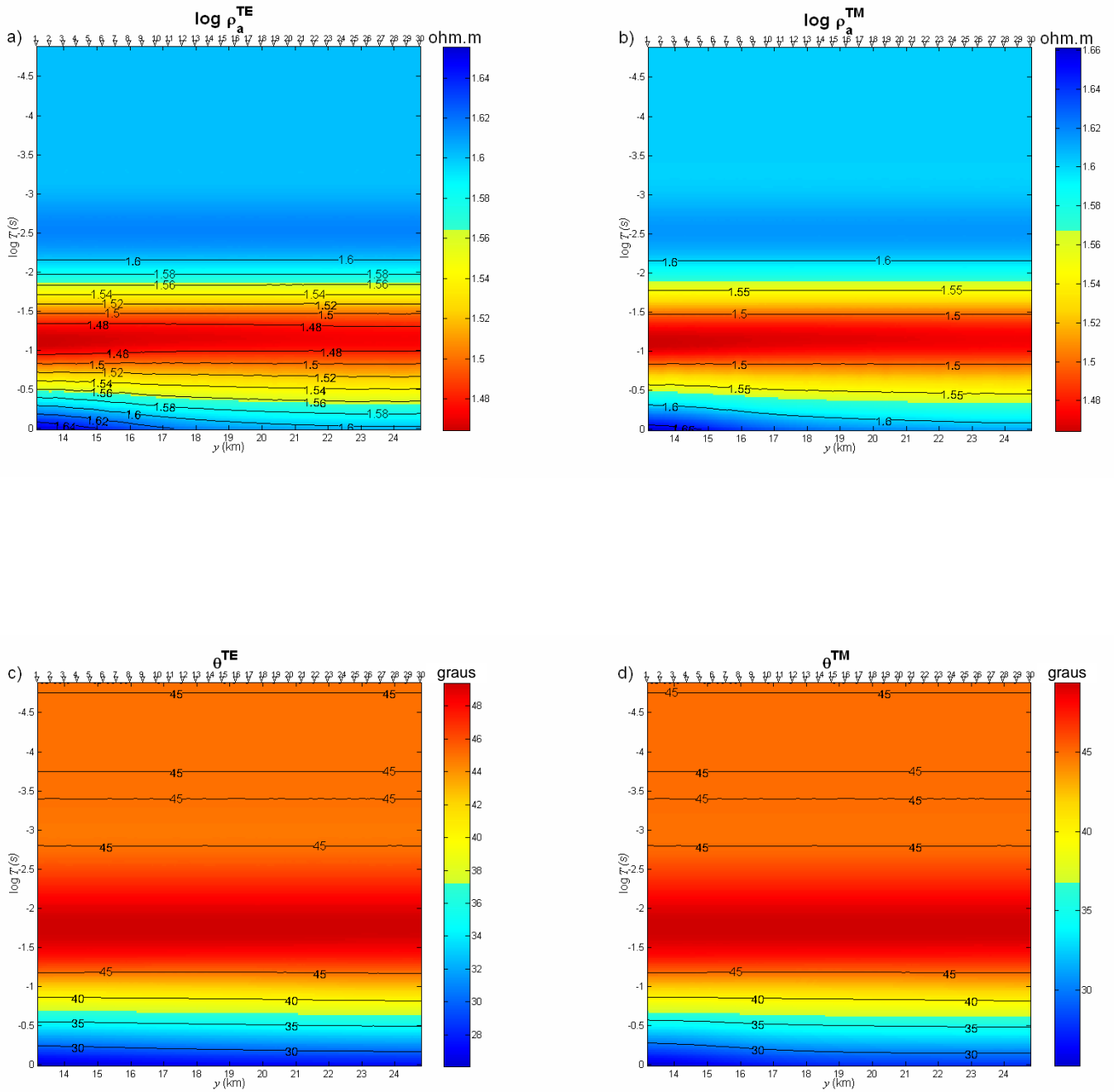


Fig. 4.16: Modelo bifurcado sem a soleira (seqüência evaporítica com resistividade de 50 ohm.m no lugar do diabásio). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.(verificar).

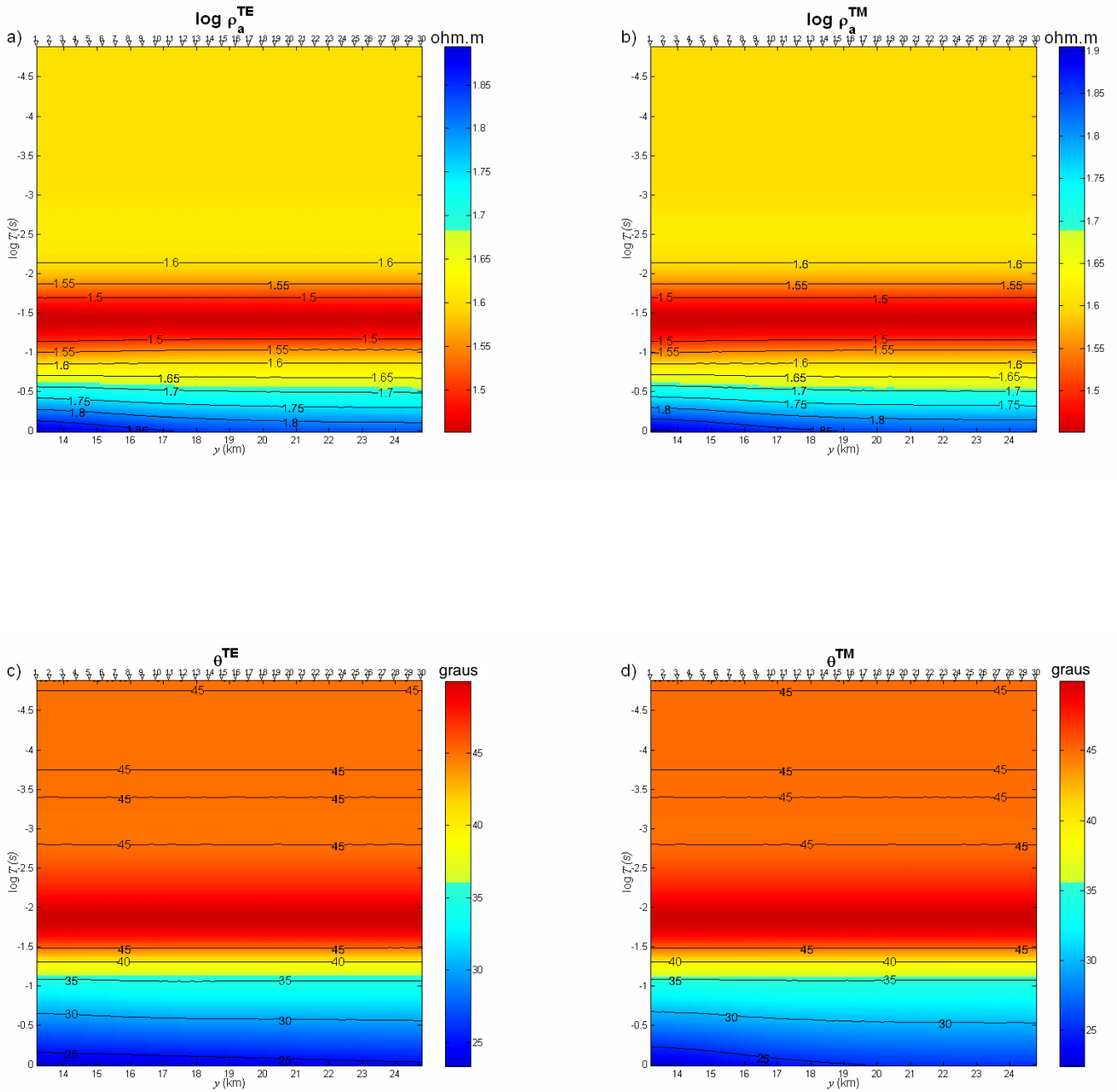


Fig. 4.17: Modelo bifurcado com soleira (Soleira com 450 ohm.m, seqüência evaporítica com resistividade de 50 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

4.2.2 Efeito do magnetismo das soleiras

Os métodos geofísicos de indução eletromagnéticos são sensíveis à resistividade, parâmetro físico abordado até aqui, bem como à permeabilidade magnética, definida como a razão entre indução magnética e campo magnético. Usa-se tanto permeabilidade para descrever o conteúdo magnético das rochas como também susceptibilidade magnética, que corresponde à razão entre magnetização e campo magnético (a permeabilidade magnética de uma substância é igual à soma da permeabilidade magnética do vácuo com a permeabilidade do vácuo vezes a susceptibilidade magnética da substância).

As ordens de mudança na magnitude da susceptibilidade magnética são pequenas comparadas à variação de resistividade nas rochas sedimentares, ou seja, enquanto a variação de resistividade é de até 10^8 , as variações de susceptibilidade são da ordem de frações decimais. O efeito de susceptibilidade magnética é invariavelmente negligenciado na prospecção eletromagnética. Estudos recentes, contudo, mostram, que vários sistemas EM são sensíveis a variações minúsculas de susceptibilidade magnética. .

Li & Cao (2005), por exemplo, abordam o estudo da influência da susceptibilidade magnética sobre a resposta de diferentes métodos EM e mostram que, para o método MT, a amplitude da resistividade aparente aumenta nas baixas frequências e que a fase seria menos afetada. Isso decorre da atenuação do campo magnético com o aumento da susceptibilidade magnética (efeito sentido mais na componente real do que na quadratura do campo). Li & Cao usaram diferenças finitas para a modelagem de uma terra essencialmente acamada, onde, localmente, ocorrem desníveis de uma camada por consequência de falhamento (graben).

Rijo (1977), por sua vez, faz um paralelo interessante entre o efeito provocado pela presença de minerais magnéticos com o efeito de deslocamento das curvas de resistividade aparente do modo TM produzido por condutores 2-D e 3-D rasos, conhecido como efeito estático, que não afeta resistividade no modo TE e nem a fase. Rijo mostra que a permeabilidade magnética de heterogeneidades rasas produz fenômeno similar ao efeito estático em curvas de resistividade aparente no modo TE, que Rijo denominou de efeito estático magnético. Rijo usou elementos finitos para a modelagem de três camadas com uma heterogeneidade rasa, cuja permeabilidade relativa (permeabilidade da heterogeneidade dividida pela permeabilidade do vácuo) varia de 1 a 5.

Ambos os trabalhos chamam a atenção para o efeito da presença de minerais magnéticos e mostram os resultados obtidos para modelos idealizados em sondagens MT.

Decidiu-se, por isto, investigar o efeito que poderia ser esperado se a soleira de diabásio atingisse permeabilidade relativa de 1,5 e 3 nas pseudo-seções saltadas e bifurcadas da Bacia do Solimões na Província de São Mateus.

Os resultados obtidos com o modelo saltado com diabásio de 450 ohm.m e 1.5 de permeabilidade magnética relativa e a seqüência evaporítica com 350, 130 e 50 ohm.m são apresentados nas Figuras 4.18, 4.19 e 4.20, respectivamente. Aumentando-se a permeabilidade magnética relativa para 3, obtêm-se as seções das Figuras 4.21 4.22 e 4.23 para a seqüência evaporítica com 350, 130 e 50 ohm.m, respectivamente.

De modo análogo, foram modeladas as respostas MT para o modelo bifurcado com permeabilidade magnética relativa para o diabásio igual a 1,5 e a seqüência evaporítica com 350, 130 e 50 ohm.m apresentados nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26, respectivamente. Finalmente, aumentando-se a permeabilidade magnética relativa para 3, obtêm-se as seções das Figuras 4.27 4.28 e 4.29 para a seqüência evaporítica com 350, 130 e 50 ohm.m, respectivamente.

As figuras mostram que a permeabilidade magnética aumenta a resistividade aparente na base das seções, evidenciando um efeito maior do embasamento. Logo, a permeabilidade atenua o campo, diminuindo a penetração, conforme Li & Cao (2005) reportaram. Li & Cao, contudo, mencionam que a fase sofre menor alteração, mas os resultados mostrados evidenciam que a fase aumenta não apenas na base do perfil como, também, a períodos menores, ou seja, na profundidade da suposta soleira de diabásio (isocontorno de 50°).

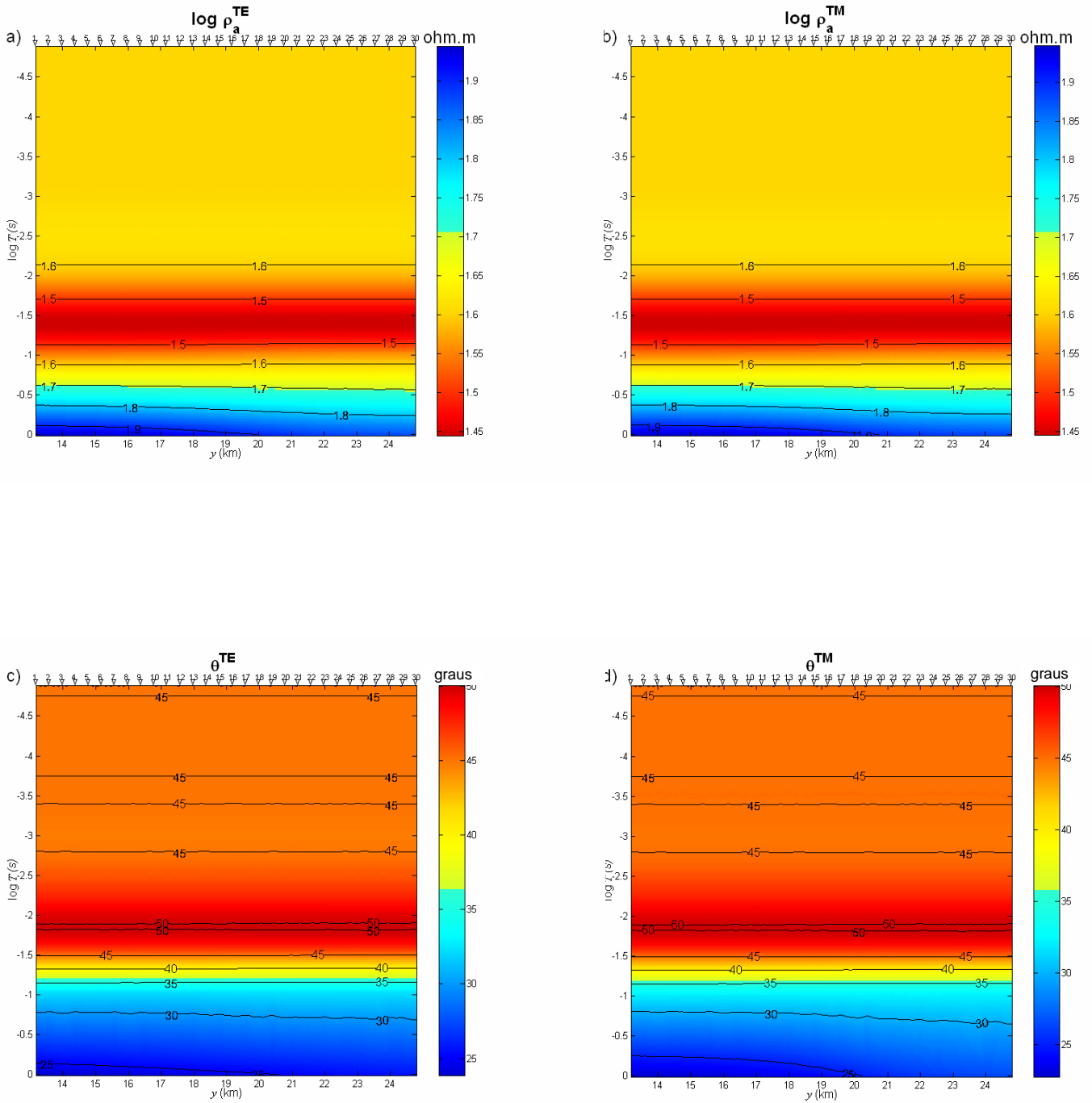


Fig. 4.18: Modelo saltado com soleira (soleira com 450 ohm.m e 1,5 como valor de permeabilidade magnética relativa, seqüência evaporítica com resistividade de 350 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

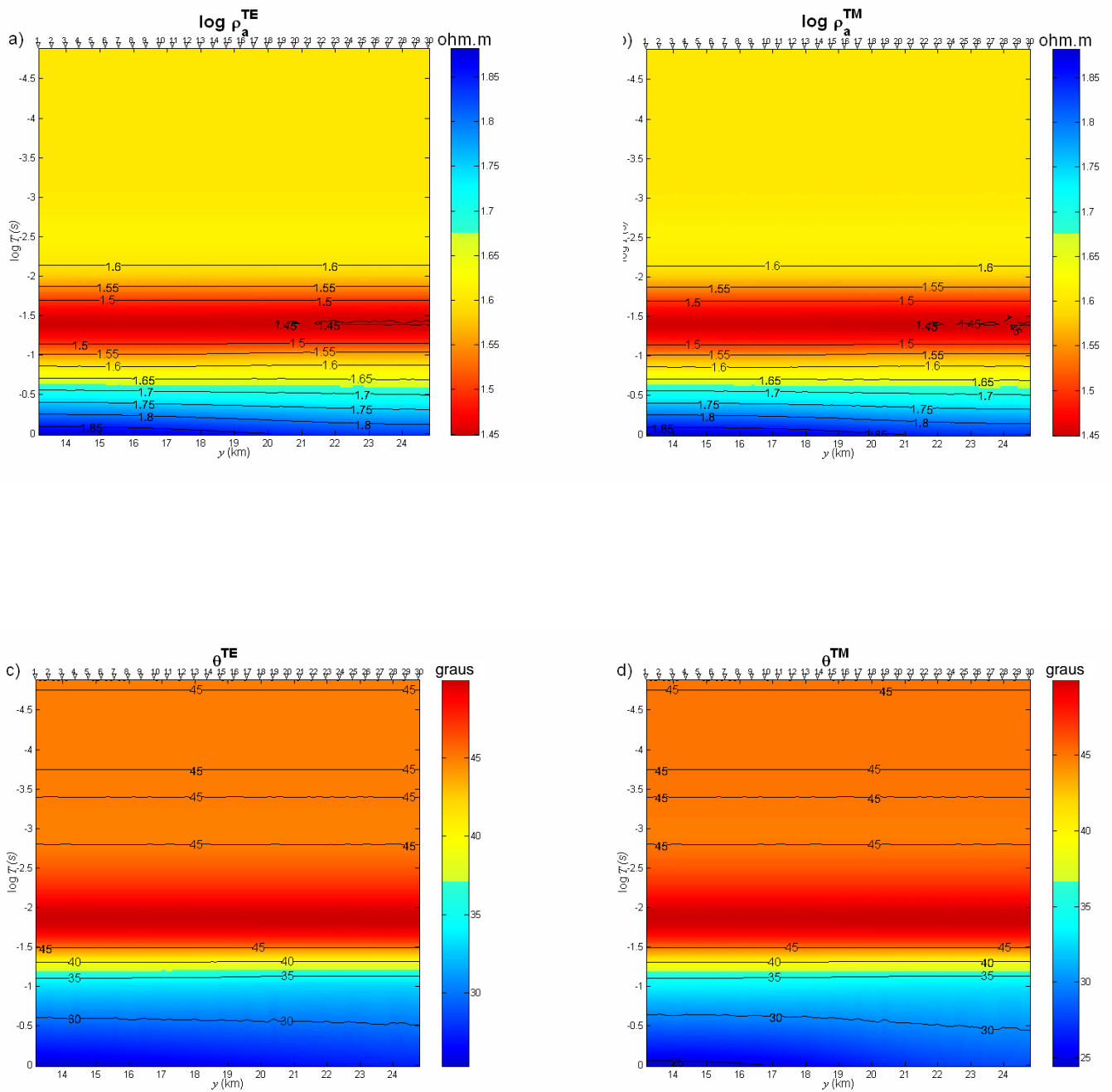


Fig. 4.19: Modelo saltado com soleira (soleira com 450 ohm.m e 1,5 como valor de permeabilidade magnética relativa, seqüência evaporítica com resistividade de 130 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

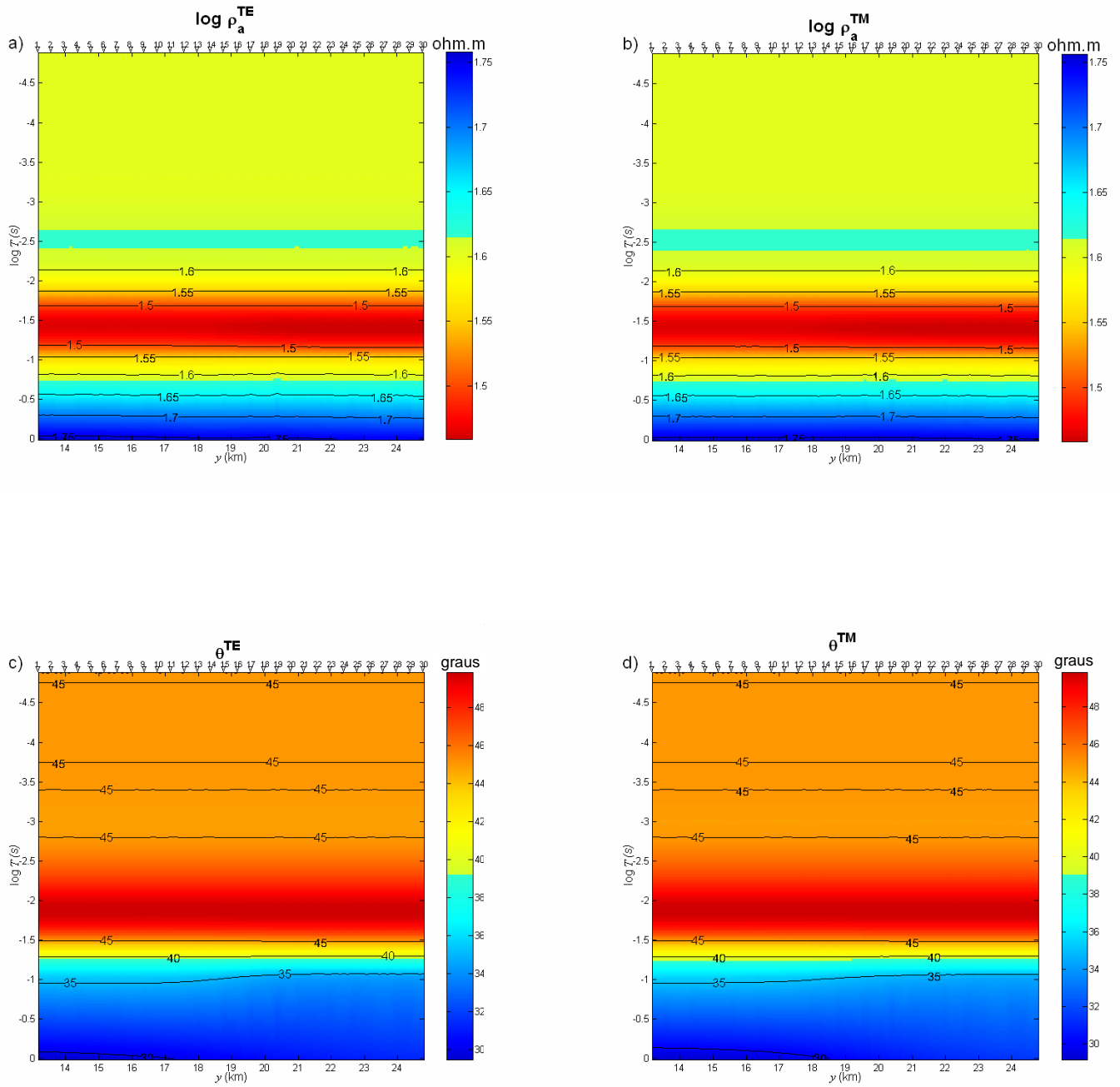


Fig. 4.20: Modelo saltado com soleira (soleira com 450 ohm.m e 1,5 como valor de permeabilidade magnética relativa, seqüência evaporítica com resistividade de 50 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

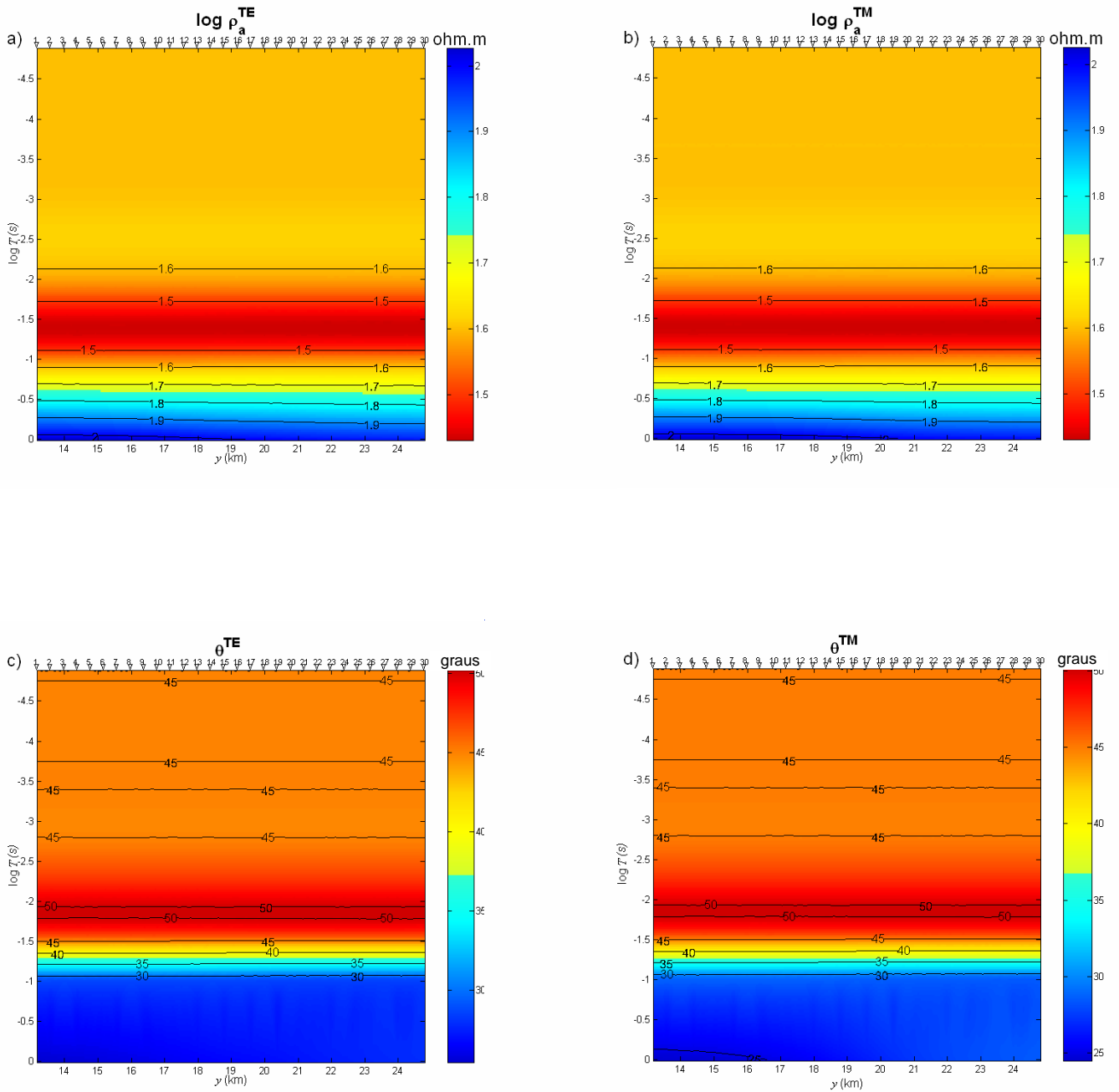


Fig. 4.21: Modelo saltado com soleira (soleira com 450 ohm.m e 3 como valor de permeabilidade magnética relativa, seqüência evaporítica com resistividade de 350 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

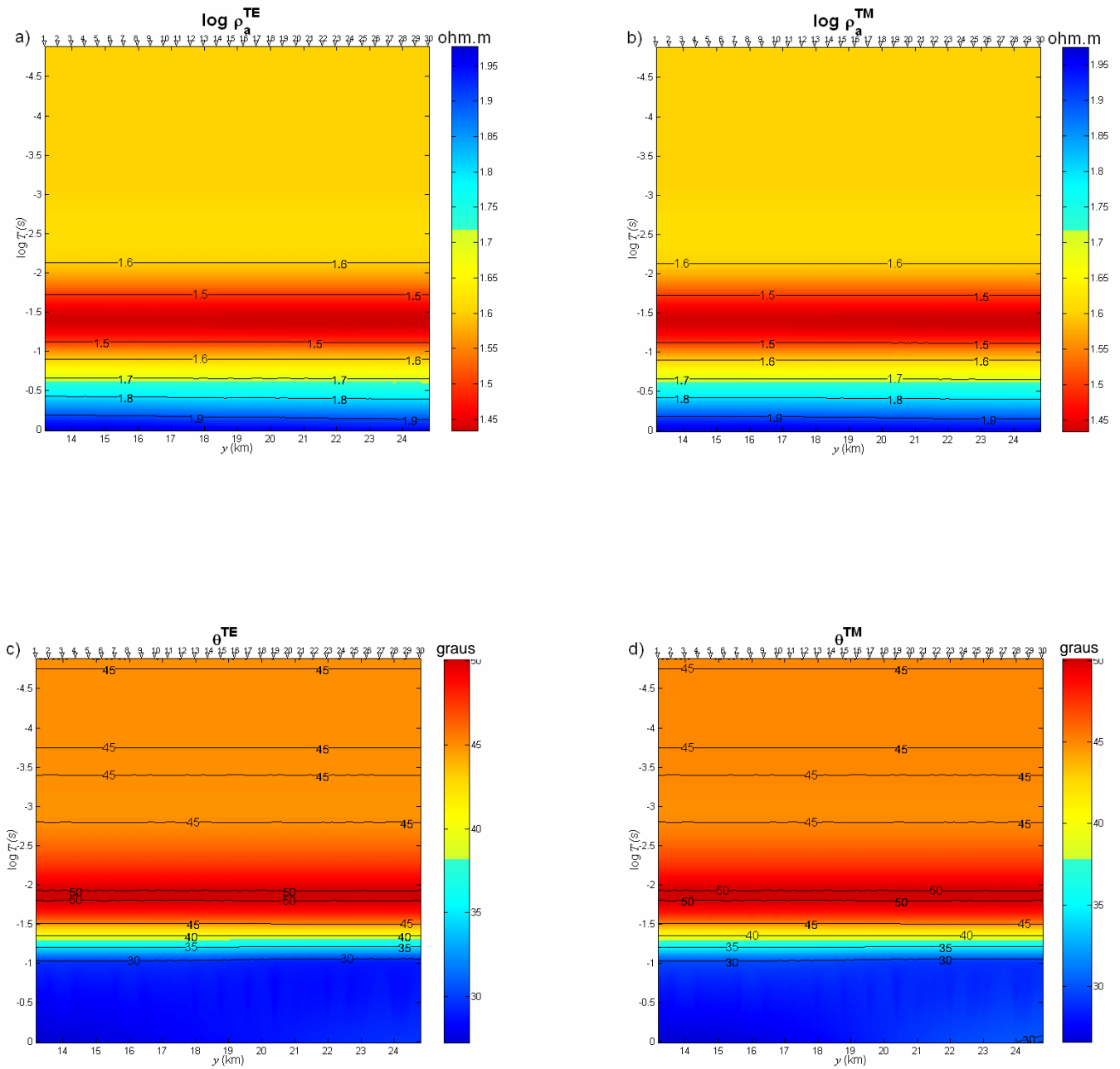


Fig. 4.22: Modelo saltado com soleira (soleira com 450 ohm.m e 3 como valor de permeabilidade magnética relativa, seqüência evaporítica com resistividade de 130 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

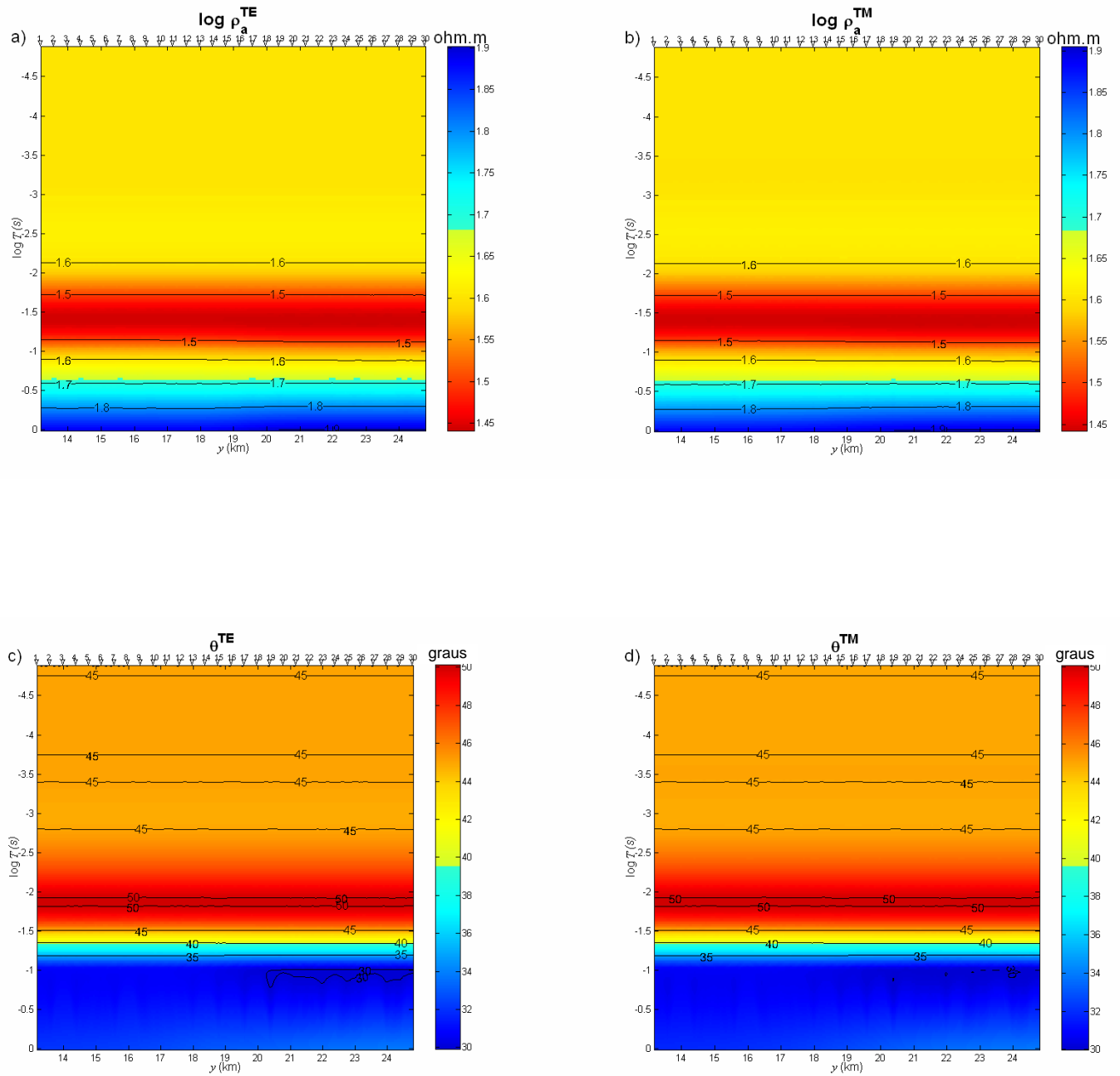


Fig. 4.23: Modelo saltado com soleira (soleira com 450 ohm.m e 3 como valor de permeabilidade magnética relativa, seqüência evaporítica com resistividade de 50 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

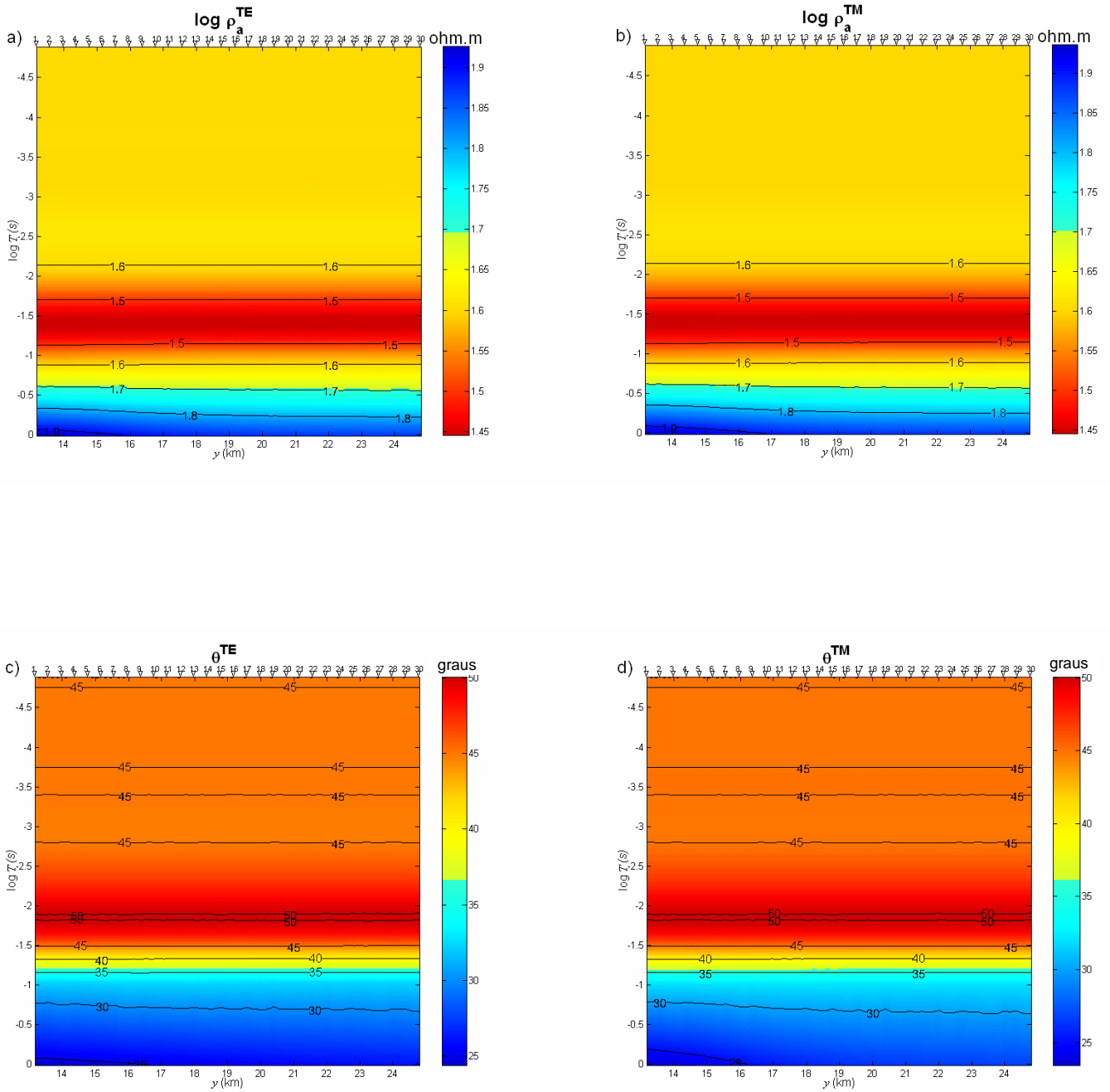


Fig. 4.24: Modelo bifurcado com soleira (soleira com 450 ohm.m e 1,5 como valor de permeabilidade magnética relativa, seqüência evaporítica com resistividade de 350 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

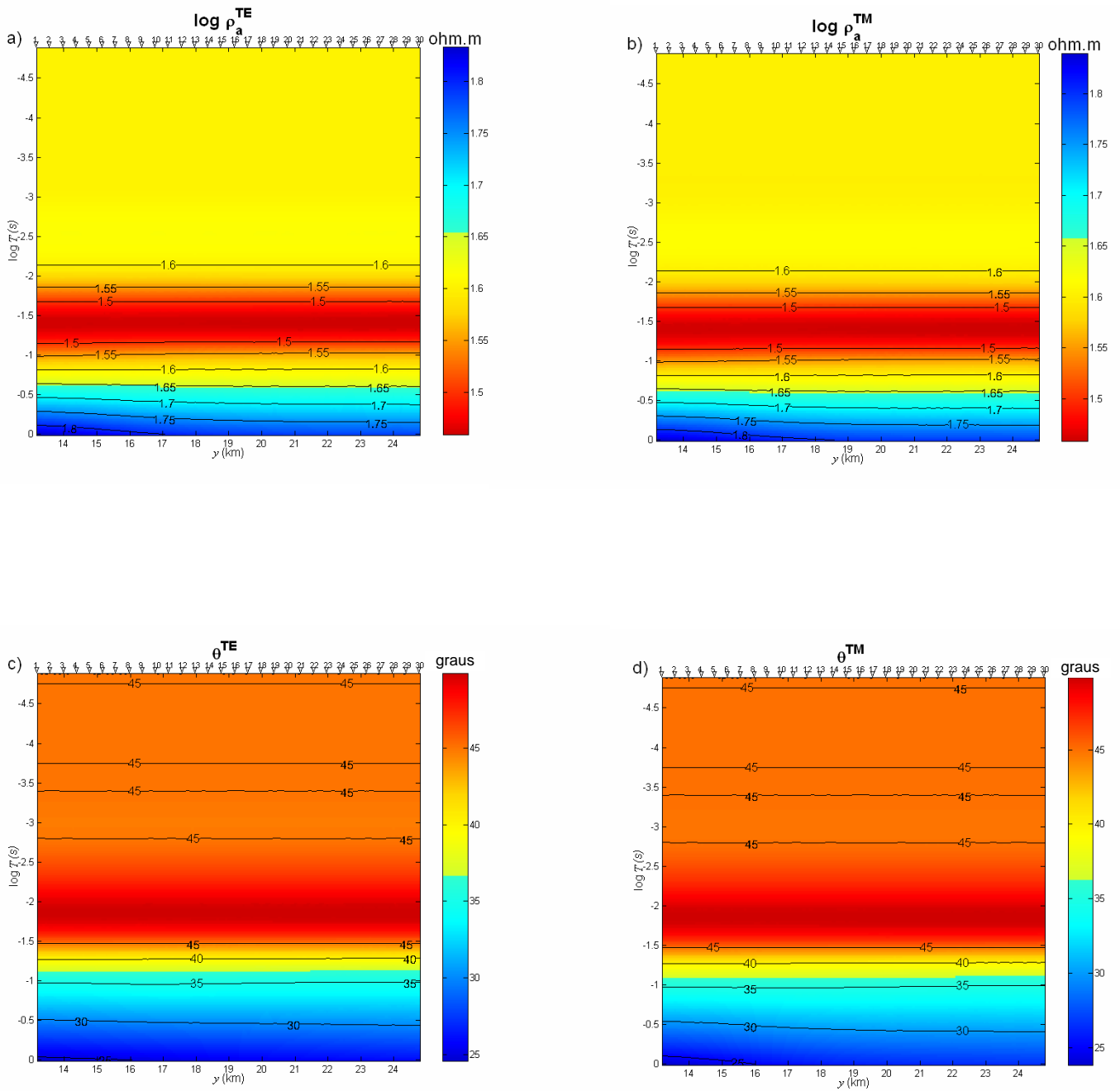


Fig. 4.25: Modelo bifurcado com soleira (soleira com 450 ohm.m e 1,5 como valor de permeabilidade magnética relativa, seqüência evaporítica com resistividade de 130 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

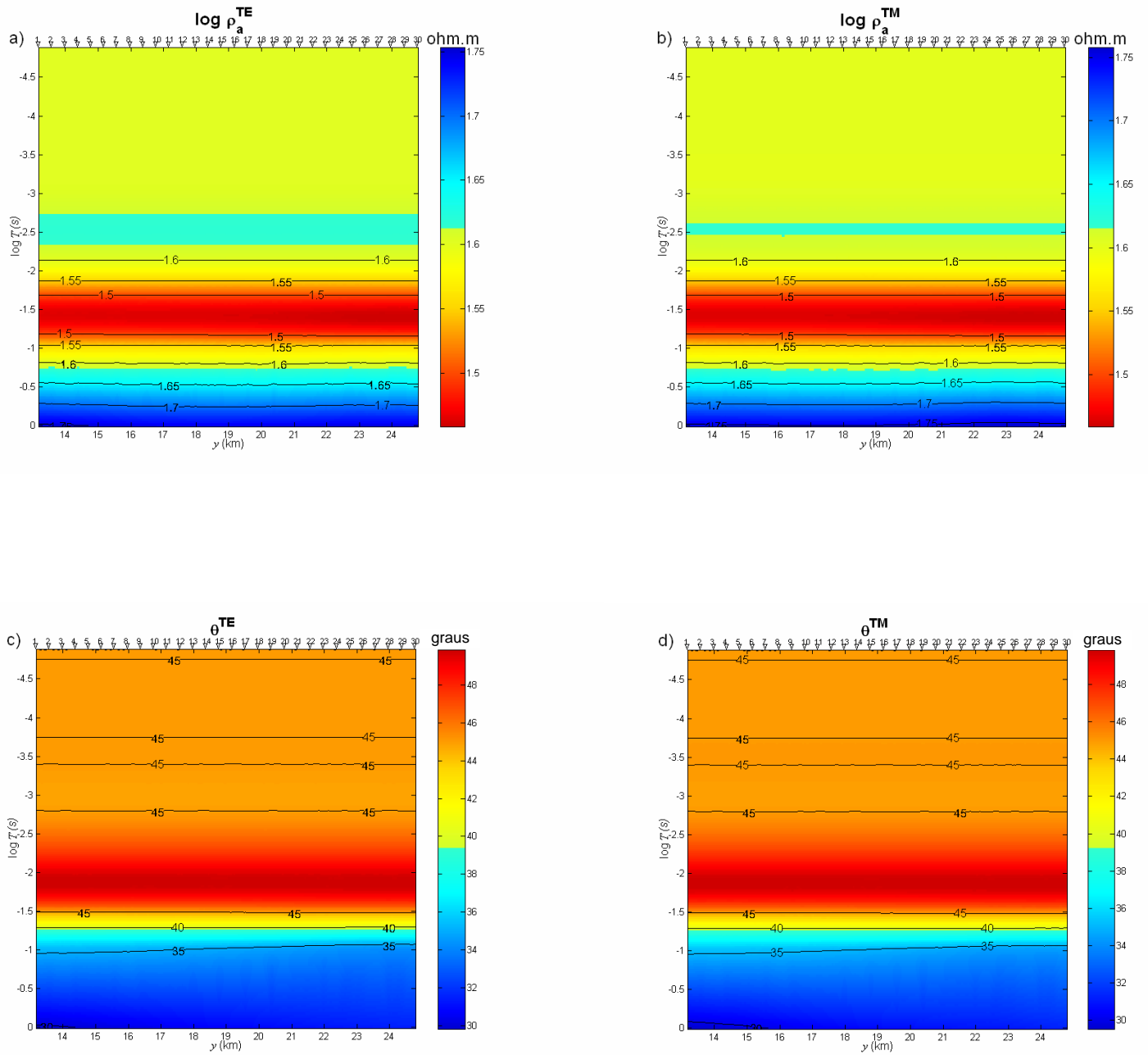


Fig. 4.26: Modelo bifurcado com soleira (soleira com 450 ohm.m e 1,5 como valor de permeabilidade magnética relativa, seqüência evaporítica com resistividade de 50 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

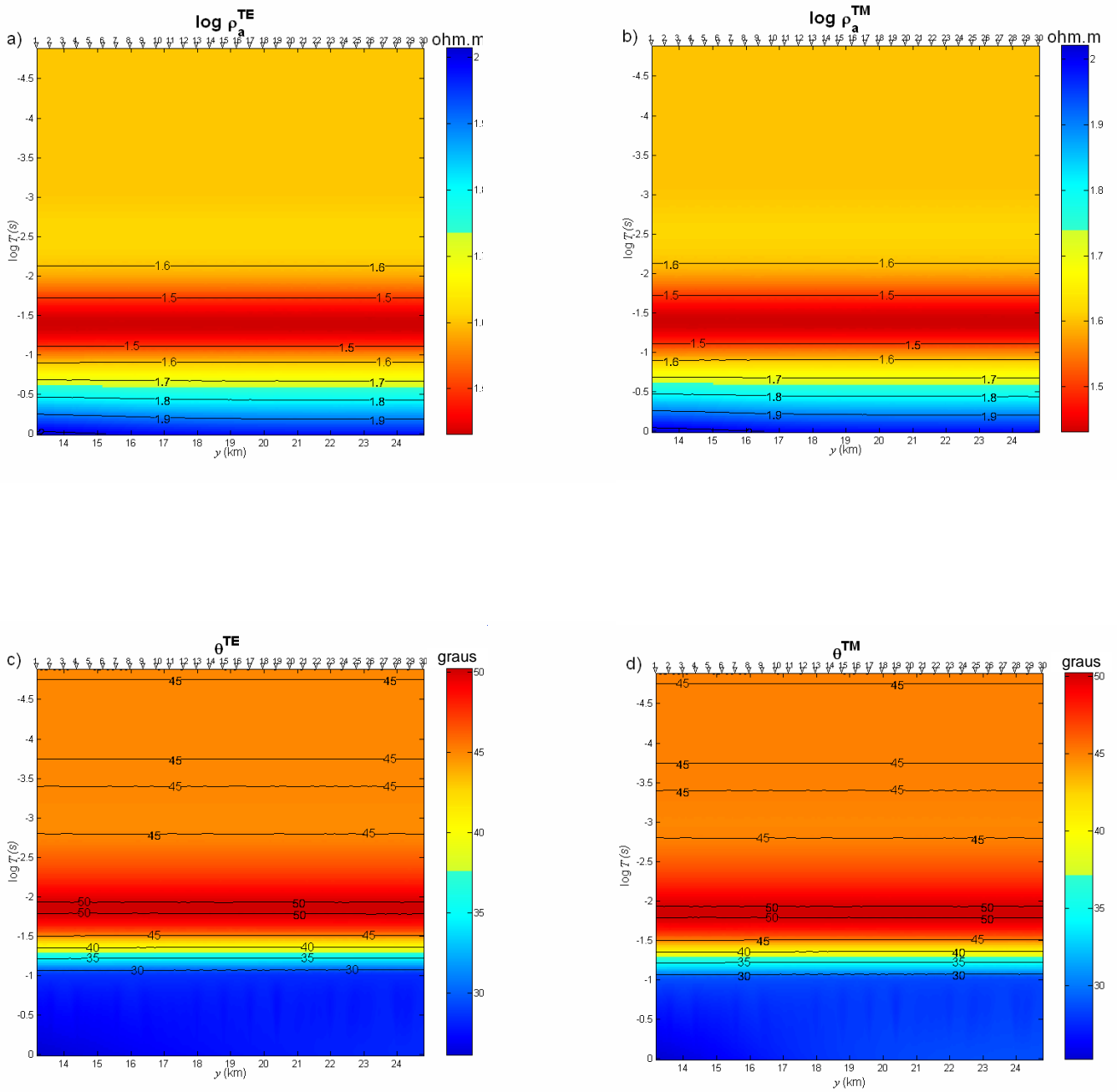


Fig. 4.27: Modelo bifurcado com soleira (soleira com 450 ohm.m e 3 como valor de permeabilidade magnética relativa, seqüência evaporítica com resistividade de 350 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

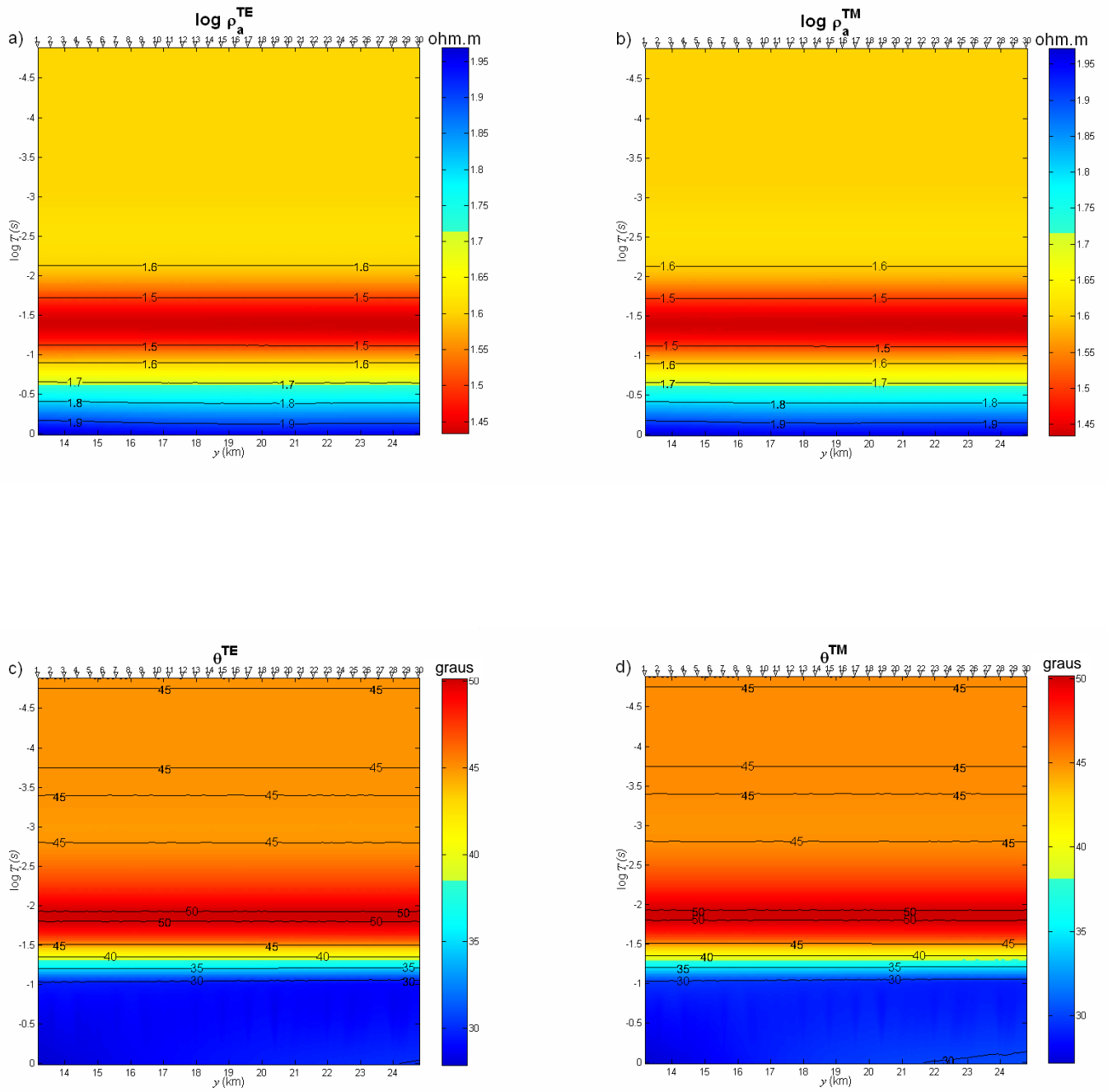


Fig. 4.28: Modelo bifurcado com soleira (soleira com 450 ohm.m e 3 como valor de permeabilidade magnética relativa, seqüência evaporítica com resistividade de 130 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

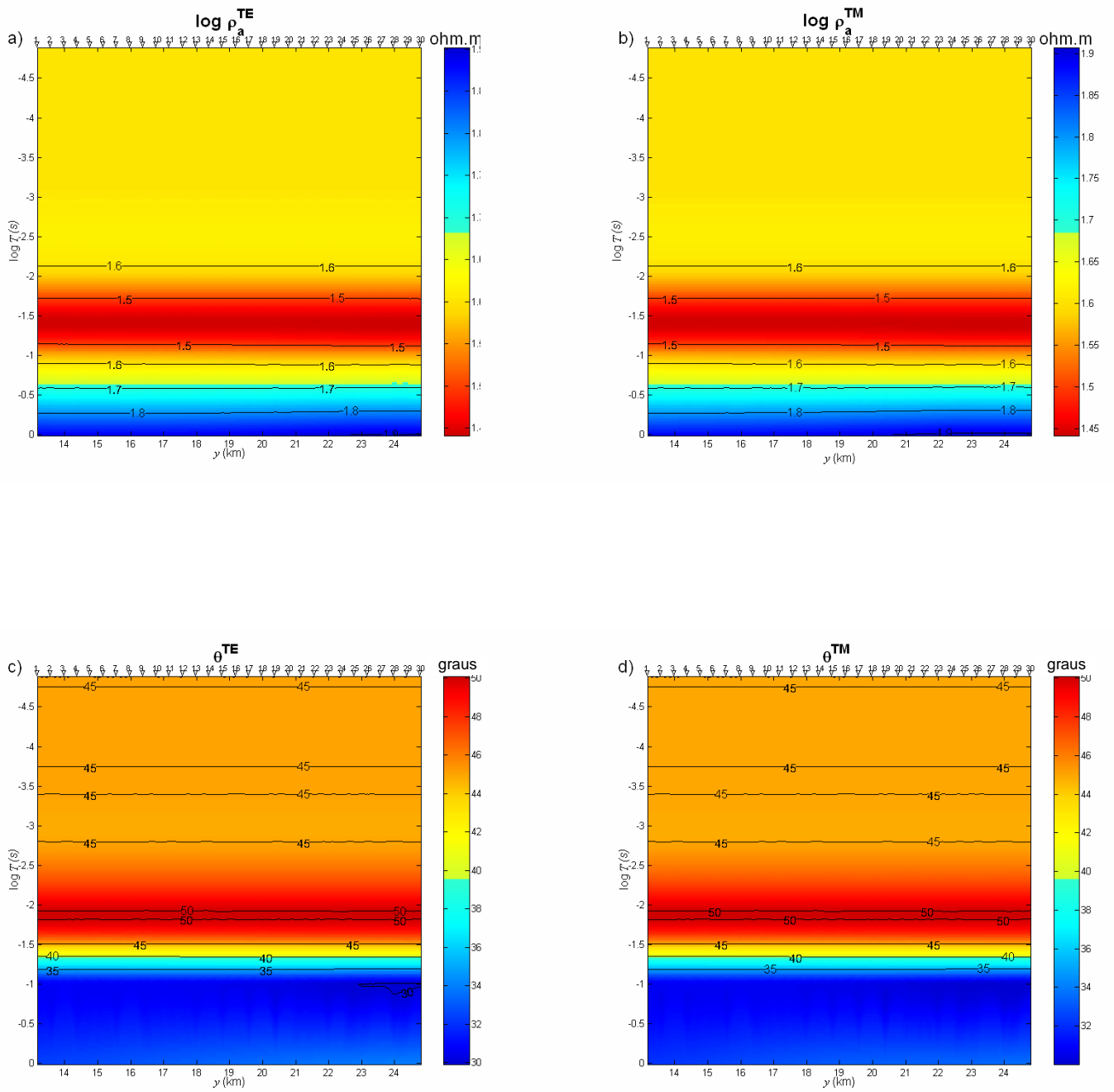


Fig. 4.29: Modelo bifurcado com soleira (soleira com 450 ohm.m e 3 como valor de permeabilidade magnética relativa, seqüência evaporítica com resistividade de 50 ohm.m). Resistividade aparente modo (a) TE e (b) TM e fase modo (c) TE e (d) TM.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os experimentos para a Bacia do Solimões mostram que a sísmica permite observar apenas topo e base das soleiras mais rasas de diabásio, enquanto o MT é sensível até o embasamento da bacia bem como à mudança de soleira saltada para a bifurcada.

A avaliação da contribuição que o MT pode dar para a investigação de áreas análogas à Província São Mateus exige, contudo, que se analisem brevemente aspectos sobre (TRINDADE et al, 2007):

- i) resolução dos dados,
- ii) aquisição de dados *versus* desenho de experimento,
- iii) amigabilidade e usabilidade dos resultados e
- iv) metodologia de interpretação.

Resolução expressa a capacidade de se distinguir feições separadas: é a menor distância entre duas feições distintas pontuais a partir da qual elas são percebidas como feições distintas ao invés de tomá-las como apenas uma feição. Resolução pode ser considerada tanto na horizontal quanto na vertical, mas o interesse recai, em geral, na resolução vertical. A dissipação ôhmica em um meio condutivo limita a penetração das ondas EM de alta frequência, de modo que 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. É bem conhecido que a sísmica possui resolução superior a do MT (que, por sua vez, é superior à resolução dos métodos magnético e gravimétrico, nesta ordem). A resolução é inerente ao kernel da expressão integral associada ao problema direto de cada método, ou seja, à física em que se baseia cada método.

A resolução é um conceito simples, mas, com frequência, não compreendido adequadamente. Isso decorre em parte porque a resolução aqui abordada é a resolução teórica. Na prática, a resolução que se obtém é inferior à resolução teórica, porque esta é degenerada por inadequações na aquisição das medidas (por exemplo, pela impropriedade seja do layout das observações, seja das frequências registradas). O aproveitamento máximo da resolução dos dados é conseguido quando o levantamento de dados é otimizado, o que exige o estudo das condições sob as quais os dados devem ser levantados no campo de modo a conter o máximo da informação possível sobre a subsuperfície. Esse estudo, conhecido como desenho de experimento, deveria ser realizado antes do levantamento, mas isto é raramente realizado, a

despeito de poder ser conduzido de modo bastante simples e efetivo (SILVA, 2006).

A amigabilidade e a usabilidade estão relacionadas às características da apresentação dos resultados do método, que é a interface entre o intérprete e o método geofísico. As figuras 3.2 e 3.3 obtidas com a sísmica possuem um fortíssimo apelo geológico, enquanto as figuras obtidas 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, porque deve ser o mais próximo possível da geologia da área, é de grande amigabilidade e usabilidade pelo intérprete.

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 \mathbf{p} a partir de \mathbf{d} , ou seja, estimar os valores de resistividade a partir da resistividade aparente e da fase (equação 4.5).

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 (SILVA, 2006).

Na interpretação, 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 obtidos pela relação $f(\mathbf{p})$. A não unicidade e a instabilidade requerem a introdução de informação a priori. No caso da inversão, que o algoritmo permita essa introdução.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho se mostrou que a soleira de diabásio permite investigar mais profundamente com o MT, em especial se considerado que ela for magnética, e, ao contrário do que na indústria do petróleo se pensa, modelos diferentes de soleira possuem respostas MT diferentes (resolução!). A dificuldade do uso do MT, portanto, é que o desenho de experimento não é comumente realizado para evitar perda de resolução e a interpretação, fundamental para fornecer o modelo físico, este de grande amigabilidade e usabilidade pelo intérprete, exige que se leve em consideração informação a priori, o que não é possível com a grande maioria dos algoritmos de inversão disponíveis.

Por isso, recomenda-se o avanço do presente trabalho com investigações voltadas a desenho de experimento e algoritmos de inversão que permitam introduzir informações a priori.

É ainda necessário fazer tentativas de apresentação dos dados sem usar a tradicional escala logarítmica para a resistividade aparente de forma a fim de não perder detalhes da resistividade aparente nos diferentes períodos.

REFERÊNCIAS

CAPUTO, M.V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. 1984. 583 f. (PhD Thesis) - University of Califórnia, Santa Barbara, 1984.

CAPUTO, M. V.; SILVA, O. B. Sedimentação e tectônica na Bacia do Solimões. Formação, origem e evolução de bacias sedimentares. 1. ed. Rio de Janeiro: CENPES. 1990. p. 169-192.

CARMICHAEL, R. S. **Handbook of physical properties of rocks**. 1982. 3 Vol. 355 f. p.273.

COSTA, J. **Programa de diferenças finitas acústicas**. Universidade Federal do Pará, Departamento de Geofísica, Belém, 2001.(Programa em Fortran)

EIRAS, J. F. et al. Bacia do Solimões. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 8, n. 1, p. 17-45. 1994.

EIRAS, J. F. Geologia e sistemas petrolíferos da Bacia do Solimões. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 6., Manaus, 1999. **Boletim de resumos expandidos**. Belém: SBG - Núcleo Norte, 1999. p. 30-32.

EIRAS, J.F. 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, 1998. Cap. 2, p.23-31. Publicação da Edição Especial The Search.

EIRAS J. F. **Tectônica sedimentação e sistemas petrolíferos da Bacia do Solimões, Estado do Amazonas Petrobras E&P-AM**. Disponível em: <<http://acd.ufjf.br/multimin/mmmp/textos/cap2p/index.htm>>. Acesso em 08 de mar. de 2006.

GARABITO CALLAPINO, G. et al. Common-reflection-surface stack:, a new parameter search strategy by global optimization. In: SEG Mtg., 71th., 2001, San Antonio, Texas. **Expanded abstracts**. San Antonio, Texas, USA, 2001. p. 2009-2012.

JOSÉ, S. A. **Modelagens magnetotélúrica e sísmica na Bacia do Espírito Santo**. 2005. 128 f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF). LENEP.Macaé-RJ. 2005

LI, X. ; CAO, J. A study of the influence of magnetic susceptibility on MT response. **Chinese Journal of Geophysics**, 2005. In press. 5p.

MIGUEL SOBRINHO, M. K.; SILVA, D. B. Estágio de acompanhamento às etapas de exploração e produção de Petróleo. Belém: Petrobras, 2007. 38p.

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.

NAZARÉ, C. P. P. et al. Aplicação dos métodos PMC e SRC em dados sísmicos sintéticos de um modelo representativo da Bacia do Solimões, Região Amazônica, Brasil In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 9., 2005. Salvador. **Expanded abstracts**. Salvador: SBGf, 2005. 1 CD-ROM.

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.

RODRIGUES, F. R. **Situação da sísmica terrestre no Brasil-Projeto ONIPGEO**- Publicação da Organização Nacional do Petróleo-Elaboração da Publicação BacoccoliConsultores. 2003. Disponível em: www.gee.ie.ufrj.br/publicacoes/pdf/2007_desenvolve_companhia.pdf. Acesso em 8 de janeiro 2007.

RESERVATÓRIO Urucu. Belém: Petrobrás, 2007. 1 CD-ROM.

THOMAS FILHO, A. et al. **Estudo integrado do pré-cambriano com eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras**. Rio de Janeiro: Petrobras/Cempes. 1984 (Relatório N^o 650-4183).

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

SILVA NETO, F. A. **Modelagem acústica por diferenças finitas e elementos finitos em 2-D e 2,5-D**. 2004. 103 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2004.

PORSANI, J. L. **Estudo da estrutura geo-elétrica da região do Juruá, AM, pelo método magnetotélúrico**. 104 f. 1991 Tese (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Departamento de Geofísica, Belém 1991.

WANDERLEY FILHO, J. R. W.; 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. Disponível em : <<http://www.onip.org.br/arquivos/?arquivo=onipgeo.pdf&PHPSESSID=ba2a559907a8b4416c4d3658e3cee496>>. Acesso em nov. de 2006.