



UFRJ

João Mauricio Figueiredo Ramos

**MÉTODO MAGNETOTELÚRICO NA BACIA DO ESPÍRITO SANTO:
DESAFIOS E POSSIBILIDADES EXPLORATÓRIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Especialista em Geofísica do Petróleo.

Orientadores:

Dr. Carlos Jorge Abreu - UFRJ

Dr. Jadir da Conceição Silva (*in memoriam*)- UFRJ

Álvaro Gomes - Petrobras

Rio de Janeiro

Março de 2007

MGL
R 175 M



João Mauricio Figueiredo Ramos

MÉTODO MAGNETOTELÚRICO NA BACIA DO ESPÍRITO SANTO:
DESAFIOS E POSSIBILIDADES EXPLORATÓRIAS

RAMOS, João Mauricio F.

Método magnetotelúrico na bacia do Espírito Santo: desafios e possibilidades exploratórias / João Mauricio Figueiredo Ramos - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2007. 79 p. : il.; 30cm

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia, 2007.

Orientadores: Carlos Jorge de Abreu, Jadir da Conceição Silva, Álvaro Gomes 1. Geofísica. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Carlos Jorge de Abreu, Jadir da Conceição Silva. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. III. Métodos eletromagnéticos na bacia do Espírito Santo: desafios e possibilidades exploratórias.

UFRJ	
Centro de Ciências Matemática e de Naturais Biblioteca Central	
N.º RESERVE	DATA
6061/10	05/01/10
ORIGEM	Doacas / UFRJ Dep. de Geologia

env. 2011

...a Petrobras, em ...

**Dedico este trabalho a
minha antiga e a minha
nova família.**

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Petrobras, por ter dado todo o apoio e material necessário para a realização desta monografia.

A UFRJ, por ter propiciado este curso de Especialização em Geofísica do Petróleo.

Ao coordenador Álvaro Gomes, por todas as orientações realizadas durante o período do curso de formação da Petrobras. Por ter nos propiciado todo o apoio durante este período, principalmente durante a reta final e conclusão da monografia, em especial atenção a preocupação com as atividades de recursos humanos.

Aos professores Leonardo Borghi, Abreu e Jadir pelas correções e pelos encontros tão necessários para esta monografia. Sem estas correções e encontros, certamente, este trabalho não poderia ser desenvolvido na qualidade desejada.

Gostaria de agradecer a Geóloga Flaviana de Almeida Costa, por gentilmente fornecer sua tese de mestrado como estudo de caso.

Aos companheiros de grupo, que diversas vezes dava sugestões e correções para melhorar este trabalho.

A toda turma de geofísicos (de todas as “espécies”) de 2006, que muito contribuíram para o meu desenvolvimento moral e acadêmico durante o curso de formação.

Aos companheiros de vivencial Eduardo Neiva, Cleber Carbonari e Vanessa Leite, que conseguiram conquistar, além de colega de trabalho, um amigo.

Gostaria muito de agradecer aqueles, que ao invés de pensar em saudades, pensaram em confiança, e dessa se confortaram com as melhores lembranças.

Aqueles que mesmo distantes, fizeram os nossos pensamentos juntos.

Aquela que, mesmo longe de tudo, acreditou no amor e confiou em mim como amigo constante, e não perdeu de vista os dias melhores, que certamente estão chegando. Núbia, muito obrigado por ficar comigo nesses dias de curso de formação. Espero que sempre esteja.

Resumo

RAMOS, João Mauricio Figueiredo. **Método magnetotelúrico na bacia do Espírito Santo: desafios e possibilidades exploratórias** 2007. 79p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A Bacia do Espírito Santo é bastante promissora do ponto de vista exploração petrolífera. Mas grandes limitações sísmicas existem devido aos altos contrastes de impedância entre as vulcânicas de abrolhos, os sedimentos, e as muralhas de sal existente em algumas porções desta. Este trabalho está focado na aplicação do método magnetotelúrico na bacia do Espírito Santo. Esta foi caracterizada geologicamente e sua evolução, estratigrafia, estruturação foram descritas sucintamente. Também apresenta os fundamentos dos métodos eletromagnéticos utilizados na exploração de hidrocarbonetos. Em seguida foi descrita a teoria do método magnetotelúrico, seus conceitos básicos, aquisição e processamento de dados. Foi exemplificando algumas publicações sobre o método magnetotelúrico no Brasil e no mundo. Estes estudos mostram a efetividade e robustez deste método na exploração geofísica de um modo geral. No final, foi realizado um estudo de caso do trabalho de COSTA (2005). Os resultados obtidos neste trabalho foram bastante animadores, já que uma parte das feições estruturais da porção emersa da bacia pode ser comprovada.

Palavras-chave: Bacia do Espírito Santo, Magnetotelúrico, Geologia Estrutural.

Abstract

RAMOS, João Mauricio Figueiredo. **Magnetotelluric method on Espírito Santo basin: exploratory challenges and possibilities** 2007. 79p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The Espírito Santo basin is a prolific basin in the oil exploration's point of view. But there are seismic limitations due high impedances contrasts between Abrolhos volcanic rocks, sediments, and the salt walls in some regions of this basin. This work is focused on application of the magnetotelluric method in the Espírito Santo basin. In this work, the basin was geologically characterized and its evolution, stratigraphy and structure was described. Also, we present the fundamentals of electromagnetics methods used in oil exploration. Next, we described the theory of the magnetotelluric method, its basics concepts, acquisition and data processing. Was exemplified some publications about the magnetotelluric method in Brazil and in the world. This publications show the effectively and robustly of this method in exploration geophysics. In the end, was developed a case study in COSTA (2005) mastering thesis. The results of this work were very interesting because some structural features of the continental portion of this basin could be confirmed.

Key-Words: Espírito Santo Basin, Magnetotelluric, Structural Geology.

Lista de figuras

Figura 1 – Mapa de localização das províncias geológicas da BES.....	18
Figura 2 – Esquema das bacias sedimentares brasileiras.	19
Figura 3–Classificação das Bacias Sedimentares segundo Klemme e Szatimari.....	20
Figura 4–Carta Estratigráfica da Bacia do Espírito (Fonte: ANP, 2006).....	23
Figura 5 – Seção sísmica na Bacia do Espírito Santo (parte marinha), mostrando seqüências estratigráficas sinrifte e pós-rifte e estruturas extensionais e compressionais características da tectônica do sal.....	29
Figura 6 – Mapa Batimétrico da região da bacia do Espírito Santo.....	34
Figura 7 – Modelo para o arcabouço tectono-magmático da região do Complexo Vulcânico de Abrolhos.	35
Figura 8 – Esquerda: Seção Strike no campo de Rio Itaúnas. Direita: Em verde, a área de Ocorrência do Play Mucuri.....	37
Figura 9 – Esquerda: representação esquemática do Campo de Cação.....	38
Figura 10 – Campo de Congoá.....	39
Figura 11 – Campo de Lagoa Parda.....	39
Figura 12 – Esquema de como são registrados os campos MMT.....	45
Figura 13 – Ancoras de concreto prestes a serem lançadas ao mar. No fundo é possível ver também os flutuadores.....	52
Figura 14 – Detalhe das ancoras de concreto.....	52
Figura 15 - Superior: Esquema do receptor moderno MMT.....	53
Figura 16 - Bobinas de indução magnética.....	54
Figura 17 – Series temporais dos campos elétrico e magnético coletadas no prospecto Gemini, Golfo do México.....	55
Figura 18 - Resultado da correção de distorção estática. Observar que a fase (gráfico inferior) não é afetada significativamente por este efeito.....	58
Figura 19 – Resultados da resistividade aparente e fase antes e depois da decomposição G-B.....	60
Figura 20 – Seção de continuidade resultado da inversão 2-D para todas as sondagens da bacia do São Francisco.....	61
Figura 21 - Seção de resistividade aparente interpretada da bacia de Anadarko, Oklahoma.....	63
Figura 22 – Combinação entre seções sísmicas e magnetotelúricas.....	64
Figura 23 – Interpretação geológica da bacia do São Francisco.....	66
Figura 24 – Seção geoeletrica interpretada.....	67
Figura 25 - Mapa de localização da área de estudo sobreposto ao mapa geológico.....	69
Figura 26 – Modelo geoeletrico 2D do perfil Espírito Santo – Baixo Guandu no modo TE.....	70
Figura 27 – Modelo geoeletrico 2D do perfil Espírito Santo – Baixo Guandu no modo TM.....	70
Figura 28 – Modelo geoeletrico 2D(modos TE e TM com inversão simultânea) do perfil Espírito Santo – Baixo Guandu.....	71
Figura 29 – Modelo geológico de subsuperfície da porção terrestre da bacia do Espírito Santo, baseado no modelo geoeletrico 2D.....	73

Sumário

Agradecimentos	vi
Resumo	viii
Abstract.....	9
Lista de figuras	10
Sumário.....	11
INTRODUÇÃO.....	12
1 GEOLOGIA DA BACIA DO ESPÍRITO SANTO.....	16
1.1 Introdução.....	16
1.1.1 Contexto Geológico.....	16
1.1.2 Generalizações sobre esta bacia	17
1.2 Evolução exploratória.....	21
1.3 Estratigrafia.....	22
1.4 Geologia Estrutural.....	27
1.5 Evolução Tectono-sedimentar	29
1.6 Magmatismo.....	32
1.6.1 Complexo Vulcânico de Abrolhos.....	34
1.7 Geologia do Petróleo.....	36
1.7.1 Sistemas petrolíferos	36
2 FUNDAMENTOS ELETROMAGNÉTICOS	40
2.1 Propriedades eletromagnéticas das rochas.....	40
2.2 Princípios Físicos (Equações de Maxwell).....	42
O MÉTODO MAGNETOTELÚRICO	44
3.1 Teoria magnetotelúrica.....	44
3.1.1 Conceitos básicos	44
3.1.2 Aproximação quase-estática.....	47
3.1.3 Ondas planas.....	48
3.1.4 Caso 1-D.....	48
3.1.5 Modos TE e TM	49
3.2 Aquisição MMT marinha	50
3.3 Processamento de dados MT marinho.....	55
3.3.1 Domínio da frequência.....	56
3.3.2 Deslocamento estático (<i>static shift</i>).....	57
3.3.3 Decomposição G-B.....	58
3.3.4 Inversão dos dados.....	60
4 ESTUDO DE CASO	62
4.1 O método MT no mundo.....	63
4.2 O método MT no Brasil.....	65
4.3 Investigações eletromagnéticas na porção continental da bacia do Espírito Santo e suas adjacências cristalinas. Dissertação de Mestrado de Flaviana de Almeida Costa (2005). Observatório Nacional.....	68
CONCLUSÃO.....	76
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	77

INTRODUÇÃO

O método sísmico é atualmente responsável por cerca de 90% dos levantamentos geofísicos para a prospecção de hidrocarbonetos. O investimento em pesquisa geofísica atinge patamares ainda maiores, mas sob circunstâncias específicas, o imageamento de subsuperfície através da sísmica de reflexão não resulta em secções totalmente confiáveis. As altas velocidades sísmicas em certas litologias resultam em grandes contrastes de impedâncias acústicas, gerando o espalhamento e a reflexão da maior parte da energia sísmica.

Também, ocorre o problema do excesso de reverberações em camadas de basaltos e calcários, que dificulta a identificação das camadas abaixo, além da dispersão excessiva da energia sísmica nas estruturas halocinéticas. Bacias que contém derrames basálticos de grandes extensões, como as Bacias do Paraná e Amazonas são exemplos reais onde o método sísmico não é totalmente eficaz.

A questão fica ainda mais complicada quando estas duas situações ocorrem simultaneamente. É o caso da Bacia do Espírito Santo, onde os desafios exploratórios são grandes, resultado das consideráveis limitações sísmicas devido a possibilidade das vulcânicas de Abrolhos se encontrarem lado a lado com as muralhas de sal, como mostrado mais adiante neste trabalho.

Assim, prováveis *plays* com geometrias complexas, totalmente plausíveis nos modelos geológicos, muitas vezes não são contempladas nas secções sísmicas, e deixam de ser comercialmente exploráveis.

Certamente estes obstáculos poderão ser superados com a utilização de métodos geofísicos complementares (como o magnetotélúrico e o CSEM), ainda muito distantes de

serem futuros substitutos da sísmica, mas que certamente podem confirmar muitos alvos interpretados.

Por exemplo, um prospecto indicado pelos intérpretes baseados na sísmica, pode conter um reservatório com água salgada ou hidrocarbonetos. Mas antes da perfuração, um levantamento eletromagnético pode indicar a presença ou não deste, devido à alta resistividade dos hidrocarbonetos em relação à baixa resistividade das águas de formação, geralmente salinas. Por minimizar esta ambigüidade, os métodos eletromagnéticos são poderosas ferramentas na avaliação de um prospecto, que juntamente com os modelos geológicos altamente complexos e as numerosas ferramentas geofísicas, reduzem as incertezas na interpretação e o risco exploratório.

A medida e a análise de campos eletromagnéticos no mar têm aplicações importantes, como por exemplo: (i) na exploração de recursos naturais, entre eles, os hidrocarbonetos; (ii) mapeamento e monitoramento de reservatórios ao longo da sua produção; (iii) o mapeamento de estruturas na base da crosta, tais como *hot spots*; (iv) na determinação da presença de poluentes no solo submarino, principalmente em manguezais e baías; (v) operações de varredura de minas explosivas submarinas, de interesse para a segurança naval (DEIRÓ, 2006).

Os cientistas na década de 50 perceberam que a medição de variações temporais dos campos elétrico e magnético em uma dada localidade poderia resultar em repetidos cálculos das propriedades geoelétricas da terra nesta localidade. Medidas magnetelúricas (fonte natural) em ambiente marinho têm sido realizadas experimentalmente desde a década de 60, quando os cientistas da Companhia Móbil Oil aplicaram-na em uma lâmina d'água de 10m. O desenvolvimento de receptores magnetelúricos banda-larga na década de 90 foi o resultado direto da demanda crescente para imagear contrastes de resistividades em profundidades apropriadas para a exploração de petróleo (LEWIS, 2005).

A aplicação dos métodos eletromagnéticos na exploração de petróleo atualmente visa complementar as outras ferramentas geofísicas (como a sísmica, os métodos potenciais, perfis de poços, entre outros), onde reservatórios de altas resistividades podem ser detectados pelos sensores, que serão descritos mais adiante. Diversos levantamentos eletromagnéticos têm sido realizados em uma variedade de prospectos em ambientes marinhos no noroeste da Europa, África, no Mediterrâneo, no Sudoeste da Ásia e no Brasil. Muitos desses têm sido comprovados por poços.

O futuro dos métodos eletromagnéticos é bastante promissor, pois, além do baixo impacto ambiental devido às transmissões de curta duração (caso seja com fonte controlada), é possível o mapeamento e monitoramento de campos de petróleo de forma menos custosa do que a sísmica 4D. Hoje, os dados eletromagnéticos (sem esquecer de mencionar os métodos potenciais) passaram a ser um bem valioso para a indústria petrolífera. Apesar de a resolução ser menor que a da sísmica, o balanço entre os altos custos dos levantamentos sísmicos e a redução dos riscos exploratórios se mostra bastante vantajoso, incentivando o crescimento desta tecnologia.

Esta monografia está focada nas possibilidades de exploração petrolífera utilizando o método magnetotélurico. Os métodos eletromagnéticos de fonte controlada (CSEM-Sea Bedding Logging, por exemplo) não serão abordados aqui.

O primeiro capítulo do trabalho está focado nos aspectos geológicos da Bacia do Espírito Santo, onde são apresentadas as litologias presentes, estratigrafia, estruturação, entre outros. Neste capítulo se encontra uma breve descrição do histórico da exploração nesta bacia, sua evolução tectono-sedimentar, magmatismo e os sistemas petrolíferos.

O segundo capítulo apresenta aspectos relacionados aos fundamentos dos métodos eletromagnéticos usados na exploração de hidrocarbonetos. Dividido em duas subseções;

uma que contém uma breve apresentação das propriedades eletromagnéticas das rochas, e outra que descreve os princípios físicos (Equações de Maxwell) destes métodos.

O terceiro capítulo é dividido em três seções. A primeira descreve o método magnetotelúrico, contendo a teoria magnetotelúrica, seus conceitos básicos, a aproximação quase-estática, ondas planas, caso 1-D e os modos TE e TM. A segunda seção apresenta a aquisição MT e os equipamentos utilizados. Já a terceira seção apresenta o processamento de dados MT.

O quarto capítulo exemplifica algumas publicações sobre o MT no Brasil e no mundo. Também são feitas recomendações sobre os locais da bacia propícios à utilização deste método. No final, foi realizado um estudo de caso baseando-se no trabalho de COSTA (2005).

Por último, a conclusão agrupa as informações mais importantes sobre a aplicação desses métodos e sobre o estudo de caso.

1 GEOLOGIA DA BACIA DO ESPÍRITO SANTO.

1.1 Introdução.

1.1.1 Contexto Geológico

O continente sulamericano pode ser dividido em regiões de acordo com a atividade tectônica mais atuante desde a quebra do paleocontinente Gondwana na era Mesozóica. Desta forma podem ser caracterizados quatro domínios principais na placa sulamericana: (1) interior (cráton), com espessas camadas de sedimentos paleozóicos e mesozóicos; (2) a oeste, margem convergente com intensa atividade orogênica (Andes); (3) a Leste, margem divergente (passiva) com extensão de aproximadamente 10000 km; e (4) ao Norte, região (Caribe) associada a regime tectônico transcorrente em contato com a placa caribenha.

Na margem Leste estão as bacias mais relevantes do ponto de vista petrolífero, uma das quais é a bacia do Espírito Santo (BES). Em comparação com a plataforma sulamericana, que é primordialmente formada por rochas ígneas e metamórficas arqueanas e está consolidada desde o Neoproterozóico (540 Ma), a margem Leste é jovem, tendo sua origem sido iniciada apenas na era Mesozóica (250 Ma). Em linhas gerais, a evolução se iniciou com uma fase rifte, com deposição de sedimentos lacustres, seguida por deposição salina em tempos aptianos e finalmente uma fase marinha que culmina com a invasão do Atlântico. Como cicatrizes desta fase têm-se as presenças de várias bacias rifte abortadas, com grábens em direção ao cráton (aulacógenos), como Potiguar e Recôncavo/Tucano/Jatobá que se desenvolveram nos estágios iniciais do Atlântico Sul (Neocomiano) e foram abortadas no Aptiano.

A margem divergente da placa sulamericana se estende por 10.000 km, do delta do Orinoco, na Venezuela, até a terra do fogo, na Argentina. Como dito no parágrafo anterior,

suas bacias sedimentares compartilham algumas características gerais como a presença de seqüências rifte, transicional e marinha. Entretanto, é importante notar que a abertura do Atlântico foi um evento diacrônico ao longo da costa, tendo ocorrido no fim do Triássico no Norte, no jurássico no Sul da Argentina, no Neocomiano na margem brasileira e no Aptiano na margem equatorial. Por ter se prolongado durante um período de aproximadamente 100 Ma é de se esperar que, descontadas características gerais, as bacias sedimentares em questão tenham estruturas bastante diversificadas.

1.1.2 Generalizações sobre esta bacia

Está localizada na região costeira e margem continental dos estados do Espírito Santo e da Bahia, entre os paralelos de 18°20' e 21°, abrangendo aproximadamente 20.000 km² *onshore* e 200.000 km² *offshore*, figura 1. Juntamente com suas “bacias irmãs” de Campos e Santos a bacia do Espírito Santo é um bom exemplo de bacia formada em margem continental passiva. Interessante notar que, rigorosamente falando, não há separação entre as três bacias em regiões de águas profundas. Em águas rasas as fronteiras se dão no arco de Vitória (ES/Campos, Pré-cambriano) e no arco de Cabo Frio (Campos/Santos). É limitada ao sul pelo alto de Vitória, a oeste pelo embasamento cristalino da Faixa Ribeira e ao norte, esta bacia é limitada pelo paleocânion de Mucuri. GUERRA (1989) descreve este último como um limite arbitrário, assim como as extensões para o mar dos limites norte e sul sendo que BIASSUSI et al. (1990) cita ainda o Complexo Vulcânico de Abrolhos como o limite leste da bacia. Seu embasamento é constituído por rochas ígneas e metamórficas pré-cambrianas. Assim como em Campos e Santos, houve importante deposição de evaporitos durante a fase transicional (“proto-golfo”). Atualmente estas barreiras de sal são importante entrave à exploração de hidrocarbonetos nestas regiões.

A principal característica que a distingue das bacias de Campos e Santos é a ocorrência de intensa atividade vulcânica, como uma extrusão de basalto no neoplioceno conhecida como Formações Cabiúnas. Já na Formação Cricaré temos sedimentação sin-rifte com espessura de 5.000 m, desde o Neocomiano ao Aptiano da qual resultam apresentando arenitos, coquinas, calcilitos e dolomitas com folhelho negro.



Figura 1—Mapa de localização das províncias geológicas da Bacia do Espírito Santo.
(FONTE:BIASSUSI, 1990)



Figura 3 – *Esquema das bacias sedimentares brasileiras. FONTE: ANP*

O intenso magmatismo terciário proporcionou o desenvolvimento de uma ampla plataforma carbonática, que alargou a plataforma continental desta bacia em relação às outras adjacentes, criando uma estruturação um tanto quando peculiar que, na fase pós-rifte, gerou diferentes compartimentações estruturais nas regiões norte e sul (GUERRA, 1989). Além do intenso magmatismo que gerou o Banco de Abrolhos e da notável compartimentação estrutural, a Bacia do Espírito Santo possui ainda outras peculiaridades, como duas províncias de domos salinos (GUERRA, 1989).

Conseqüências do episódio de magmatismo que gerou o Banco de Abrolhos incluem, além das influências sobre a fisiografia e batimetria, importantes modificações na história geológica mais recente das bacias do Espírito Santo, Campos e Santos, que as tornaram singulares no contexto pós-rifte da evolução da margem leste (SOBREIRA & FRANÇA, 2006).

1.2 Evolução exploratória.

A evolução histórica das atividades de prospecção na BES, resumidamente extraída de COSMO et al. (1991) e de LIMA & AURICH (19??), apresenta três fases principais: (i) 1959-1971, (ii) 1972-1979 e (iii) após 1979.

(i) Esta fase é caracterizada por um ritmo pouco intenso das atividades de perfuração e exploração. O primeiro estudo geológico regional na BES foi realizado em 1959. Este recomendou exploração geofísica nas margens do rio Doce e na costa atlântica adjacente (COSMO et al., 1991). Mas a exploração efetivamente começou no início dos anos 50 com levantamentos sísmicos, gravimétricos, magnetométricos e com um poço estratigráfico teste perfurado em 1959 (LIMA & AURICH, 19??).

Um levantamento gravimétrico em 1958 indicou a presença de um baixo estrutural confirmado por uma sondagem estratigráfica teste em 1968. As zonas de óleo foram testadas, mas o poço foi abandonado como subcomercial (COSMO et al., 1991). Neste mesmo período foi realizada uma das primeiras sondagens *offshore* do Brasil com a perfuração do poço 1-ESS-1. Os extensivos levantamentos geofísicos e as sondagens estratigráficas permitiram o delineamento dos principais padrões estruturais e estratigráficos que resultaram na primeira descoberta de óleo onshore realizada em 1969 na plataforma de São Mateus.

(ii) Baseando-se no mapeamento sísmico da superfície basal de um paleocânion foi descoberto o paleocânion de Fazenda Cedro e do campo com esse mesmo nome. A partir deste fato, as atividades de perfuração assumiram um caráter mais intensivo iniciando também os processos de exploração. Os levantamentos sísmicos realizados até então, guiados por estudos prévios e interpretações fotogeológicas, resultaram no delineamento de um outro padrão geral de paleocânion, denominado paleocânion de Regência.

Um programa de reflexão sísmica na área foi realizado em 1978 (387 km de linhas sísmicas) visando aumentar a definição dos limites e para propósitos exploratórios. A produção de óleo em 1978 era de 7600 bpd.

(iii) Iniciado com a descoberta do campo de Lagoa Parada, verificou-se uma notável intensificação no processo de avaliação da bacia, com grande ênfase nas atividades de desenvolvimento.

Até 1990 existiam 285 poços exploratórios (área emersa), 66 poços pioneiros na plataforma continental e 36 campos produtores, dos quais apenas 1 se encontrava na porção submersa (BIASSUSI, 1990).

Até 2002, haviam sido perfurados 405 poços exploratórios e levantados 19.715 km de sísmica em terra. No mar, havia 129 poços exploratórios e 125.380 km de linhas sísmicas. Já foram descobertas 51 acumulações de hidrocarbonetos, sendo 46 na parte terrestre, com volumes da ordem de 467 MM m³ de Óleo-Equivalente *in place* (MILANI et al., 2000).

Hoje, com uma melhor aquisição de sísmica de reflexão e melhor processamento, juntamente com dados paleontológicos, tornou-se mais fácil mapear as bases dos paleocânions e detectar as trapas.

1.3 Estratigrafia

A análise estratigráfica adotada obedece à precedência das definições de VIEIRA et al. (1994), Figura 4. Atualmente, as rochas sedimentares da Bacia estão organizadas em três Grupos: Nativo, Barra Nova e Espírito Santo, com idades que variam do eocretáceo (Neocomiano) até o Terciário.

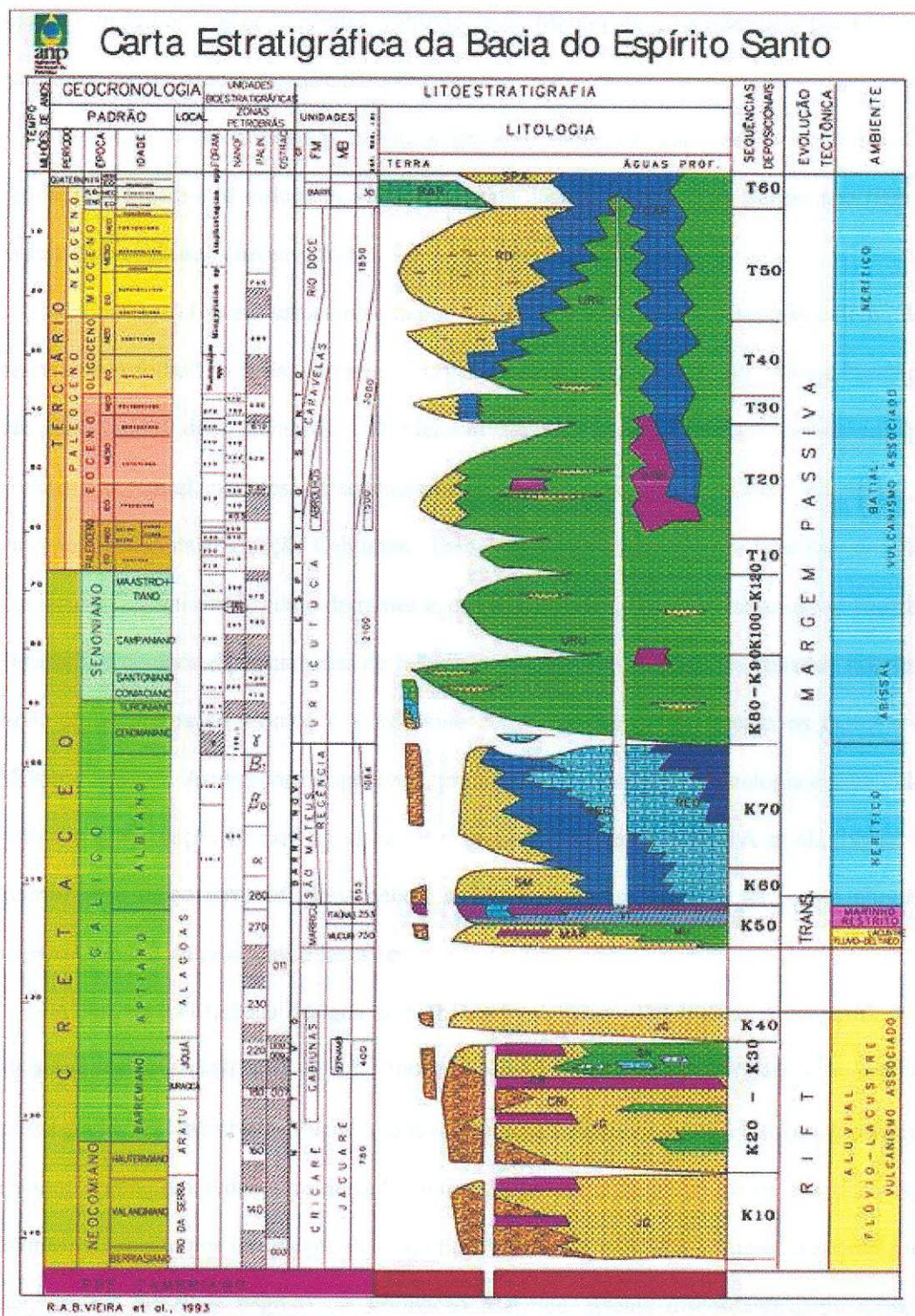


Figura 4– Diagrama estratigráfico da Bacia do Espírito (Fonte: VIEIRA et al., 1993).

O embasamento sob a bacia do Espírito Santo é formado por um complexo de terrenos ígneos e metamórficos pertencentes à Província da Mantiqueira, representado por gnaisses, granulitos e migmatitos (BIASSUSI, 1990).

O Grupo Nativo congrega clásticos grossos, folhelhos, calcáreos e evaporitos das formações Cricaré e Mariricu. A idade conhecida destas rochas vai do Berriasiano (Rio da Serra) até o eoalbio (neoalagoas).

A Formação Cricaré caracteriza-se por conglomerados, arenitos, coquinas e dolomitos, associados à folhelhos ricos em carbono orgânico (MILANI et al., 2000). Nesta Formação são distinguidos dois membros. O Membro Jaguaré é essencialmente constituído por arenitos e conglomerados, freqüentemente intercalados com rochas vulcânicas e vulcanoclásticas da Formação Cabiúnas. Esta é constituída por basaltos toleíticos de idade Eocretácea, caracterizada como derrames e, em alguns casos, como paleossolos. O Membro Sernambi é composto por camadas de folhelhos, calcáreos e margas. Os contatos inferior e superior da Formação Cricaré é discordante com o embasamento e com os arenitos do Membro Mucuri. As datações disponíveis, principalmente dados de palinologia e ostracodes, atribuem à Formação Cricaré as idades Rio da Serra/eoalagoas (VIEIRA et al., 1994). A interpretação paleoambiental deste pacote sedimentar aponta sistemas de leques aluviais, sistemas fluviais entrelaçados e lacustres.

A Formação Mariricu designa as rochas sedimentares siliciclásticas e evaporíticas de idade neoaptiana (MILANI et al., 2000). Nesta unidade litoestratigráfica podem ser reconhecidos os membros Mucuri, formado predominantemente de clásticos grosseiros, arenitos e conglomerados com delgadas intercalações de folhelhos e níveis evaporíticos, e Itaúnas, composto por um pacote de evaporitos - anidritas e halitas - intercalado com finas camadas de folhelhos negros. A Formação Mariricu assenta discordantemente sobre o embasamento ou com a Formação Cricaré (discordância pré-neoalagoas). Suas rochas são

resultados da primeira ingressão marinha na bacia. As rochas clásticas foram depositadas por sistemas fluviais entrelaçados e deltaicos, e os evaporitos provêm de *Sabkhas* e sub-bacias. A partir de determinações bioestratigráficas atribui-se idade neolagoas para esta unidade (VIEIRA et al., 1994).

O Grupo Barra Nova representa a primeira sedimentação essencialmente marinha na bacia. Reúne as formações São Mateus e Regência, compostas por arenitos grossos de fácies marinha marginal que gradam para calcáreos no sentido do mar (MILANI et al., 2000), com idades que compreendem desde o eoalbiano até o eocenomaniano.

A Formação São Mateus corresponde a espessos pacotes de arcóseos médio/grosso, castanhos e cinzentos. Seu contato inferior com a Formação Mariricu é concordante e o superior é gradacional ou interdigitado lateralmente com a Formação Regência, ou discordante sob o Grupo Espírito Santo. As datações bioestratigráficas com base em palinomorfos, foraminíferos, foraminíferos plantônicos e nanofósseis calcários conferem idade albiana à Formação São Mateus (VIEIRA et al., 1994). Interpreta-se para as rochas da Formação São Mateus a deposição por leques aluviais e costeiros associados à ambiente marinho raso.

A Formação Regência é caracterizada por espessas camadas carbonáticas constituídas por calcarenitos e calcirruditos de plataforma rasa. Seu contato inferior é gradacional com as formações São Mateus e Mariricu, e discordante com o embasamento. As determinações bioestratigráficas conferem idade Albiana aos carbonatos (VIEIRA et al., 1994). O ambiente de deposição preconizado para esta unidade era marinho raso, em plataforma carbonática.

O Grupo Espírito Santo distribui-se do Cenomaniano ao Recente, formando um sistema transgressivo e posteriormente regressivo, onde se reconhece o ambiente nerítico, batial e abissal. Segundo MILANI et al. (2000), corresponde a uma seqüência de plataforma progradacional, formada por uma face arenosa proximal (Formação Rio Doce), intercalada

com carbonatos (Formação Caravelas); o conjunto torna-se pelítico em seu contexto mais distal, junto ao talude e à bacia profunda (Formação Urucutuca).

A Formação Urucutuca é constituída por folhelhos cinza-escuro a claros com intercalações delgadas de calcilitos e margas. Interpostos a estes sedimentos ocorrem pequenos níveis de arenitos turbidíticos. Seus contatos superior e lateral com as formações Rio doce e Caravelas são transicionais. A idade Cenomaniana a Recente é conferida pela presença de nanofósseis calcários, palinórfos e foraminíferos plantônicos (VIEIRA et al., 1994). Esta sedimentação pelítica Urucutuca foi depositada em águas profundas e ambientes de talude.

A Formação Caravelas é composta predominantemente por calcarenitos bioclásticos e calcilitos plataformais. Seus contatos inferior, superior e lateral são gradacionais com as formações Urucutuca e Rio Doce; localmente, os carbonatos repousam sobre as rochas vulcânicas da Formação Abrolhos. Sua idade terciária, entre o mesooceno e o Holoceno, é interpretada a partir da presença de foraminíferos bentônicos (VIEIRA et al., 1994). Esta unidade foi depositada em plataforma carbonática.

A Formação Rio Doce designa os arenitos e calcários que ocorrem ao longo da borda oeste da bacia. Seu contato inferior é gradacional com as formações Urucutuca e Caravelas, ou discordante com as formações Regência, São Mateus, Mariricu ou mesmo o embasamento. Estas rochas foram depositadas por leques costeiros e plataforma carbonática.

A Formação Abrolhos, de idade neopaleoceno/eoceno, é caracterizada por uma associação litológica complexa aflorante no arquipélago de Abrolhos. Engloba basaltos de composição toleítica, material piroclástico e sedimentos intercalados, assumindo uma tendência subalcalina a alcalina. Trata-se de um vulcanismo de conduto central em ambiente marinho e acumulado sobre plataforma continental estreita. Sua área de maior ocorrência é

na porção submersa destas bacias, incluindo-se aí o Banco de Abrolhos (ALAMEIDA et al., 1996).

1.4 Geologia Estrutural.

Os episódios tectônicos a prévios a fragmentação do Gondwana (episódios Transamazônico e Brasileiro, por exemplo) estabeleceram lineamentos pré-cambrianos importantes na estruturação da Bacia do Espírito Santo. Estes lineamentos facilitaram o rifting nas zonas de fraquezas da porção sul do Gondwana gerando uma série de falhamentos normais e complexos.

O embasamento da Bacia do Espírito Santo consiste em gnaisses, granulitos, migmatitos e granitóides, cuja estruturação possui direção geral *N-NE* (CORDANI et al., 1984). Esses constituem a Faixa Ribeira, que sofreu retrabalhamento tanto no ciclo Transamazônico quanto Brasileiro. Desses períodos foi herdada uma estruturação na direção *N20-30E*. Essa direção controla fortemente as orientações das falhas normais no interior da bacia.

As seqüências sedimentares dos andares Jiquiá e Alagoas apresentam padrão tectônico semelhante ao embasamento, prevalecendo o sistema *N-NE* de falhamentos normais, principal condicionador da estruturação da fase rifte.

A partir do Albiano, a bacia evoluiu para um ambiente marinho, enquanto a formação de crosta oceânica, decorrente do estiramento litosférico, marcava a ruptura definitiva do Gondwana. Durante a abertura do Atlântico Sul foram geradas fraturas de extensão de direção preferencial *N60-80E*, que segundo GUERRA (1989), poderiam ter controlado a estruturação do paleocânion de Regência. Ao final da fase distensiva, deu-se o resfriamento da anomalia térmica produzida durante a extensão litosférica, levando à contração e conseqüente subsidência térmica. Esta, ampliada pela sobrecarga sedimentar e pela ascensão

do nível do mar, causou o basculamento progressivo da plataforma continental em direção ao mar e o soerguimento das regiões emersas adjacentes. Este basculamento provocou o deslizamento gravitacional dos sedimentos, condicionando a estruturação pós-rifte da bacia, fortemente influenciada pela tectônica halocinética. A bacia apresenta diferentes taxas de extensão nos setores norte e sul, com as falhas lítricas mantendo-se ativas por mais tempo na área sul. Estruturas localizadas de compressão são mapeadas na porção norte da bacia, e atribuídas por GOMES et al. (1988), a um evento transcorrente de direção noroeste, iniciado no nealagoas. Existem ainda os lineamentos de direção *N45-60W*, relacionadas às zonas de cisalhamento reativadas verticalmente, que segundo CUNHA (1985), exerceram controle no Cânion de Fazenda Cedro.

Do Neocretáceo ao Terciário, o estilo tectônico é predominantemente controlado pelo fluxo de sal, porém com forte influência dos derrames da Formação Abrolhos. Segundo MORIAHK (2003), o estilo de tectônica de sal apresentado é condicionado pela sobrecarga das rochas vulcânicas de Abrolhos formando frentes de empurrão com vergência na direção do continente. Numa primeira fase de halocinese, ocorreu a formação de falhas extensionais normais com mergulho predominantemente para leste. Numa segunda fase, a barreira formada pela extrusão e intrusão de lavas basálticas e rochas ígneas na região de Abrolhos resultaram num obstáculo para o fluxo de sal na direção da bacia profunda, causando a mobilização de evaporitos e folhelhos em direção contrária (oeste), associada a falhas de empurrão com vergência na direção do continente, e formação de feições compressionais (Figura 5). No terceiro estágio, ocorreu a formação de diápiros de sal penetrante nas camadas mais jovens, alguns dos quais afetam o Terciário Superior e o Quaternário.

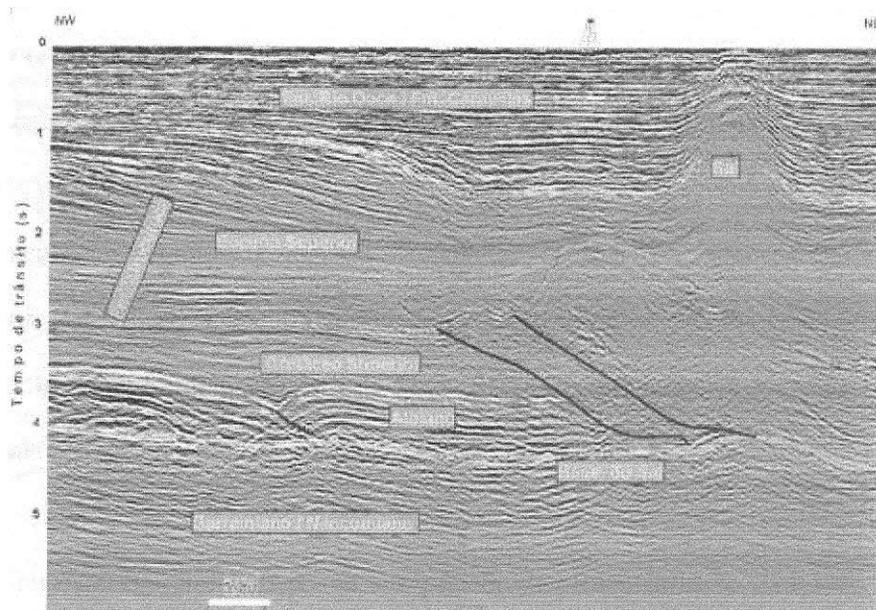


Figura 5 – Seção sísmica na Bacia do Espírito Santo (parte marinha), mostrando seqüências estratigráficas rifte e pós-rifte e estruturas extensionais e compressionais características da tectônica do sal. (FONTE: BIZZI *et al.*, 2003)

1.5 Evolução Tectono-sedimentar

A Bacia do Espírito Santo é uma bacia típica de margem divergente. Sua origem está relacionada ao processo de rifteamento que afetou o continente Gondwana durante o Eocretáceo. Ao longo da sua evolução sedimentar podem-se individualizar três grandes unidades com características tectono-sedimentares distintas: (1) Seqüência Continental - abrange os basaltos da Formação Cabiúnas e os sedimentos continentais da Formação Cricaré, afetados pela tectônica rifte; (2) Seqüência Transicional, caracterizada pela sedimentação siliciclástica-evaporítica da Formação Mariricu e relativa quiescência tectônica; e (3) Mega Seqüência Marinha, caracterizada pela deposição marinha franca, carbonática no início e predominantemente siliciclástica posteriormente, representada pelas

formações Urucutuca, Caravelas, Rio Doce e Abrolhos, afetadas por intensa tectônica adiastrófica.

Do neocomiano ao eoaptiano, sobre o embasamento pré-cambriano, foi instalado um sistema de vales em rifte como resultado de esforços tensionais associados à ruptura crustal do continente Gondwana. O registro sedimentar ocorreu em depocentros alongados controlados por falhas, cujas irregularidades paleotopográficas foram responsáveis pela sedimentação de um amplo espectro de fácies, desde conglomerados junto às falhas até pelitos mais distais, constituindo-se desta sucessão sedimentar flúvio/lacustrina a Formação Cricaré.

Na transição Barremiano/Aptiano, um período de pleneplanização do relevo da bacia, condicionou-se a sedimentação posterior sobre uma ampla discordância pós-rifte de caráter regional, indicativa do término da fase de estiramento litosférico e rifteamento da crosta continental.

O neoaptiano marca o início da incursão marinha na bacia. A seqüência sedimentar é representada pela Formação Mariricu, caracterizada por uma seção basal de clásticos do Membro Mucuri, cobertos por um pacote de evaporitos do Membro Itaúnas. Segundo CHANG et. al. 1992, esta seqüência sedimentar sofreu influência da estreita passagem do mar entre as costas brasileiras e africanas, responsável pela restrição da circulação de água que em conjunto com o clima quente e seco vigente na época conseguiu manter alta a taxa de evaporação em relação ao influxo de água, resultando na deposição de espesso pacote evaporítico.

Durante o Albiano-Cenomaniano, devido ao progressivo afastamento entre as placas da América do Sul e África, a bacia evoluiu para condições marinhas rasas propiciando o desenvolvimento de uma ampla plataforma carbonática instalada sob um clima quente e seco. Sua deposição ocorreu em meio à instabilidade tectônica. Nas áreas litorâneas, leques

aluviais se interdigitam com a seção carbonática. A seção albiana é caracterizada pelos carbonatos da Formação Regência e os arenitos da Formação São Mateus. Localmente, os arenitos constituem-se em excelentes reservatórios, enquanto que os calcáreos, folhelhos e margas da Formação Regência representam os geradores albianos da bacia. Na transição eoalbiano/mesoalbiano, a evolução da bacia é intensamente influenciada pela tectônica adiastrófica relacionada à movimentação de sal (halocinese) originada pela sobrecarga de sedimentos e basculamento da bacia. A halocinese teria criado uma série de falhas listricas que se propagam para a sedimentação mais nova, criando uma estruturação complexa associada à tectônica salífera, com almofadas de sal, cascos de tartaruga, diápiros de sal, muralhas de sal, falhas extensionais e compressionais.

No fim do Albo/Cenomaniano, o progressivo aumento da taxa de basculamento para leste e a elevação do nível do mar levou ao aprofundamento da bacia. Como consequência, a plataforma carbonática é afogada, marcando em definitivo a fase oceânica com o estabelecimento do ambiente marinho profundo a batial.

Durante o Cenomaniano passa a dominar uma sedimentação pelítica em ambiente abissal representada basicamente por folhelhos e margas, com intercalações de arenitos turbidíticos, depositados em ambiente de talude que correspondem à Formação Urucutuca. Segundo PEREIRA (1992), a base da Formação Urucutuca representa um marco na história deposicional da bacia, pois está relacionada à importante perturbação tectônica, iniciada no neoturoniano e ligada a esforços gerados por reajustes gerais da geometria ou na velocidade de deslocamento/criação da placa sulamericana. Esta etapa coincide com a principal fase de escavação do paleocânion de Fazenda Cedro e Regência.

Para BIASSUSI et al. 1990, os paleocânions tiveram sua implementação controlada por sistemas de falhas do embasamento e proporcionaram situações ideais para a formação de acumulações de hidrocarbonetos. A implantação dos paleocânions permitiu a divisão da

porção emersa da bacia em quatro províncias geológicas distintas (Figura 1): (1) Plataforma de São Mateus, a norte, que constitui as partes mais rasas, caracterizadas por reservatórios arenosos de idade Alagoas; (2) Plataforma Regência, a sul, onde ocorreu o desenvolvimento de extensa plataforma carbonática durante o Albiano; (3) e, intercalados a esta, os paleocânions de Fazenda Cedro e Regência, onde os reservatórios são arenitos turbidíticos com idades que variam do neocretáceo ao Eoceno.

No neopaleoceno/eoeceno um intenso magmatismo alcalino, representado na bacia pela Formação Abrolhos, alterou a fisiografia da porção leste desta, com expressivos derrames de lavas seguidos pela construção de uma plataforma carbonática sobre o substrato vulcânico, denominada Banco dos Abrolhos (ASMUS et al. 1971).

Do meso/eoceno ao Recente, instalou-se um sistema de leques costeiros, plataforma-talude, representado por arenitos de ambiente marinho nerítico/transicional da Formação Rio Doce, carbonatos de águas rasas depositados em ambiente de talude da Formação Caravelas e a parte superior dos pelitos da Formação Urucutuca.

1.6 Magmatismo.

O processo de rifting que, do neojurássico ao eocretáceo, deu origem ao oceano Atlântico Sul foi acompanhado e sucedido por inúmeros eventos magmáticos nas bacias da margem continental, nos altos que as separam, bem como no continente emerso adjacente (ALMEIDA et al., 1996). Na literatura são descritos dois importantes episódios de vulcanismo: um ligado ao processo de rifting no cretáceo, e um outro ligado possivelmente a um *hot spot*.

O estudo do magmatismo na BES é importante porque, além de outras coisas, nesta bacia a zona de geração (janela de geração e craqueamento térmico) pôde ser alcançada a

profundidades menores do que as convencionais devido ao sobreaquecimento nas porções proximais ao derrame que originou o CVA. O vulcanismo basáltico da fase rifte, de idade neojurássica/eocretácea, representa-se amplamente nas camadas inferiores das bacias da região sul-sudeste, Santos e Campos, e estende-se à Bacia do Espírito Santo, assim como aos altos que as separam Cabo Frio e Vitória (ALMEIDA et al.,1996). As rochas ígneas básicas da Formação Cabiúnas ocorrem principalmente na porção terrestre da Bacia do Espírito Santo, sob a forma de derrames de basalto de composição toleítica eventualmente associados com paleossolos (ALMEIDA et al.,1996).

A Formação Abrolhos, representativa do segundo evento (*hot spot*), é caracterizada por uma associação litológica complexa, englobando rochas ígneas básicas de composição toleítica a alcalina, vulcanoclásticas e eventuais intercalações de rochas sedimentares. Trata-se de um vulcanismo de conduto central em ambiente marinho e acumulado sobre plataforma continental estreita. Sua área de maior ocorrência é na porção submersa destas bacias, incluindo-se aí o Banco de Abrolhos (ALMEIDA et al.,1996).

O Complexo Vulcânico de Abrolhos (CVA) é uma província ígnea basáltica formada durante o Paleogeno na margem continental leste brasileira, no segmento correspondente às bacias do Espírito Santo, Cumuruxatiba e Mucuri (SOBREIRA & FRANÇA, 2006). Ao olhar a figura 6, percebemos a Cadeia Vitória-Trindade e o Banco de Abrolhos, uma feição peculiar a esta bacia que estende grandemente a quebra da plataforma nesta região.

A cadeia vulcânica Vitória-Trindade orienta-se a leste-oeste, em direção à Bacia do Espírito Santo. É um conjunto de montes submarinos, *guyots* e, em seu extremo oriental se situam as ilhas de Trindade e Martim Vaz, formadas de produtos vulcânicos alcalinos (ALMEIDA 1960;1961).

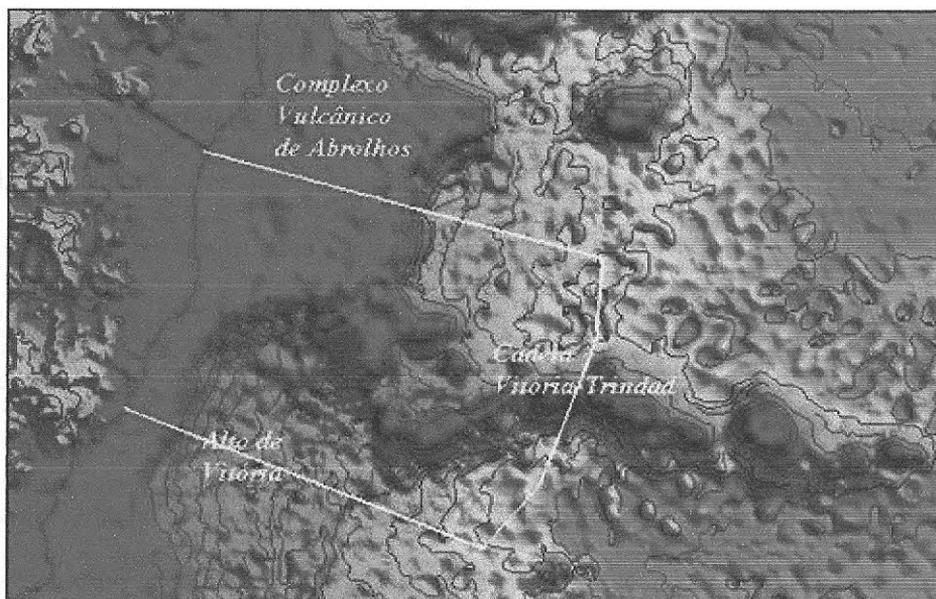


Figura 6 – Mapa Batimétrico da região da bacia do Espírito Santo. Em azul temos as isóbatas, e em amarelo, a porção emersa da BES. (Fonte: TOPEX).

1.6.1 Complexo Vulcânico de Abrolhos.

Talvez a característica mais marcante da bacia ES seja a ocorrência de uma província vulcânica, o Complexo Vulcânico de Abrolhos (CVA). De acordo com os modelos atuais, Abrolhos teria sido formado já em tempos cenozóicos durante um importante evento magmático provavelmente associado a um ponto quente mantélico (*hot spot*), cujo ápice foi entre 60 e 40 Ma. Esta atividade provoca um rearranjo estrutural importante do neopaleoceno ao Eoceno. Por abranger uma grande extensão territorial, indo da linha de costa até praticamente a quebra da plataforma continental e por conta das alterações estruturais que causou, a presença de Abrolhos é importante para a correta caracterização da bacia e teria impactos em atividades exploratórias de hidrocarbonetos.

O CVA pode ser descrito como uma província ígnea basáltica, formada durante atividade vulcânica no Paleogeno. O vulcanismo se desenvolveu já em ambiente submarino e

derramou basalto sobre crosta continental formada desde a fase rifte no eocretáceo. Os únicos afloramentos do CVA são cinco ilhotas na costa sul da Bahia.

Diferentemente de autores que descrevem o complexo vulcânico de abrolhos como uma província ígnea aproximadamente contínua, SOBREIRA & FRANÇA (2006) propuseram um modelo tectono-magmático baseado na integração de dados geológicos e geofísicos, no qual uma distribuição não-uniforme das rochas vulcânicas é sugerida bem como a localização de antigas câmaras magmáticas, possíveis focalizadoras do fluxo térmico (Figura 7).

Também mencionam que, perifericamente a esta zona de ocorrência principal de rochas vulcânicas, teriam sido depositadas rochas sedimentares e vulcanoclásticas mais jovens, que devido a uma menor sobrecarga, seriam possíveis locais de nucleação dos domos salinos e intrusões ígneas.

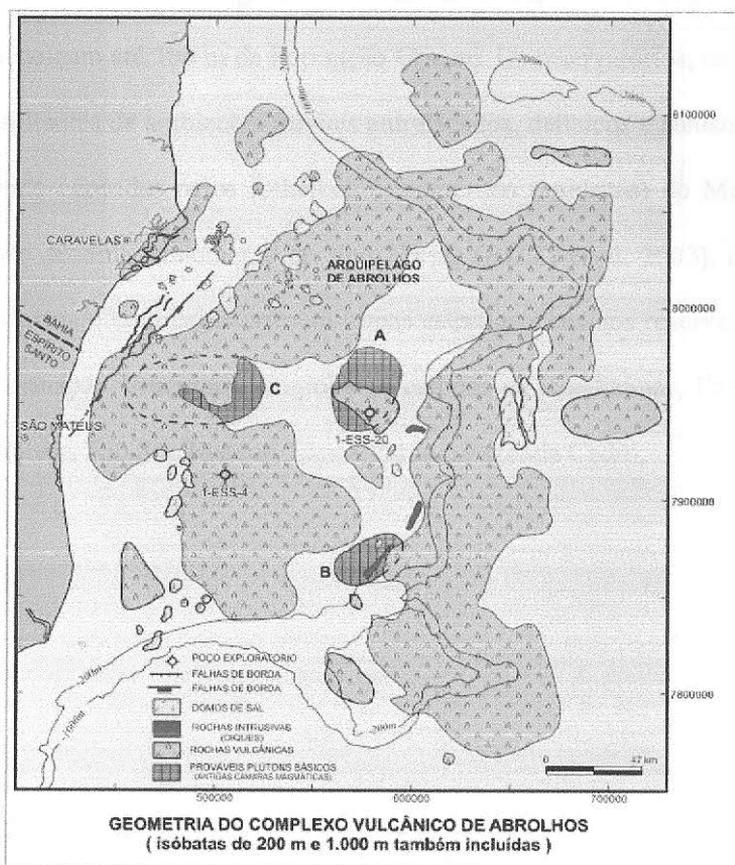


Figura 7 – Modelo para o arcabouço tectono-magmático da região do Complexo Vulcânico de Abrolhos. (FONTE: SOBREIRA & FRANÇA, 2006).

1.7 Geologia do Petróleo.

Segundo a ANP, em 2001 foram descobertas na BES 51 acumulações de hidrocarbonetos, sendo 46 na parte terrestre. As reservas atuais são de 12 MM de m³ de óleo de 11 BB de m³ de gás.

1.7.1 Sistemas petrolíferos

Na BES são descritos dois sistemas petrolíferos e quatro *plays*, a saber:

(i) Cricaré-Mucuri

Nesse sistema, o gerador é de idade Neocomiana/Barreimiana, sendo composto por folhelhos lacustres com carbono orgânico na faixa de 2-7%, com querogênio do tipo II, e espessuras que alcançam até 300 m da Formação Cricaré. Os reservatórios, de idade Aptiana, são depósitos resultantes de ambientes fluviais entrelaçados, deltaicos e lacustres do Membro Mucuri, geralmente capeadas pelos folhelhos e evaporitos (anidritas) do Membro Itaúnas, onde as trapas são predominantemente do tipo *Horsts* (BIZZI et al, 2003), como mostra a figura 8. O Óleo Cricaré também ocorre em trapas estratigráficas nos reservatórios arenosos turbidíticos da Formação Urucutuca. Engloba os campos de Rio Itaúnas, Ilha da Caçumba, Rio Preto, São Mateus, Rio São Mateus, Lagoa Parda e Fazenda Cedro.

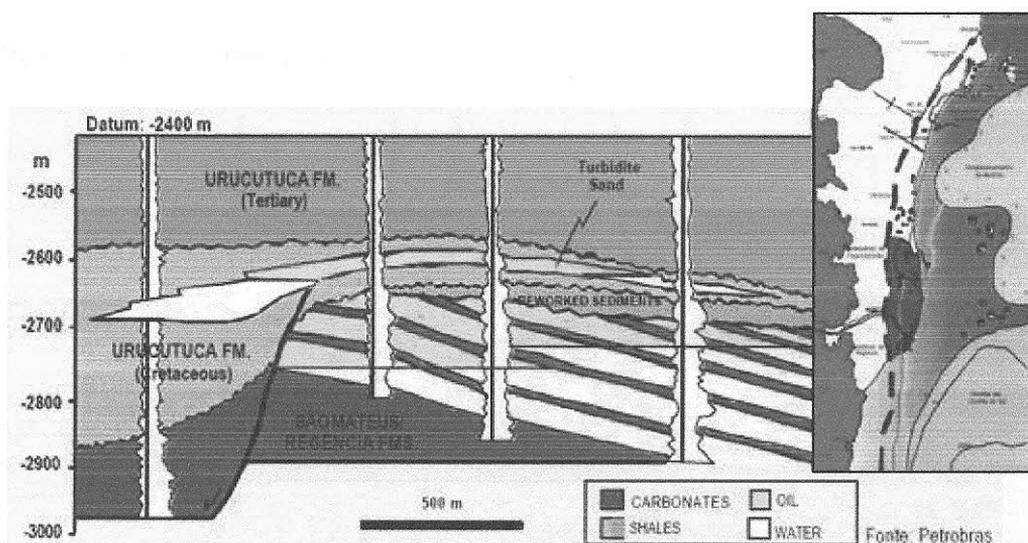


Figura 8 – Esquerda: Seção Strike no campo de Rio Itaúnas. Direita: Em verde, a área de Ocorrência do Play Mucuri. (FONTE: Petrobras, Marília Rodrigues de Castro, ANP).

(ii) Cricaré-Itaúnas (Play Itaúnas)

O gerador e o selante são os mesmos descritos na Cricaré-Mucuri (!), mas os reservatórios são carbonatos secundários do Membro Itaúnas, do Alagoas Superior. Nesse *play* estão incluídos os campos de Fazenda São Jorge, Guriri e Lagoa Bonita.

(iii) Regência-São Mateus (Play Barra Nova)

Os geradores são os calcários, folhelhos e margas da Formação Regência, de idade albiana/cenomaniana. Os reservatórios são os arenitos da formação São Mateus, também de idade Albiana/Cenomaniana. Nesse *play*, os selantes são os folhelhos da Formação Urucutuca e os calcilititos da Formação Regência. Um fato a ser enfatizado é que o gerador às vezes se comporta também como selante. As trapas são tanto do tipo estrutural,

relacionadas a *rollovers*, quando do tipo estratigráficas (paleogeomórficas). O campo de Cação está contido nesse *play*.

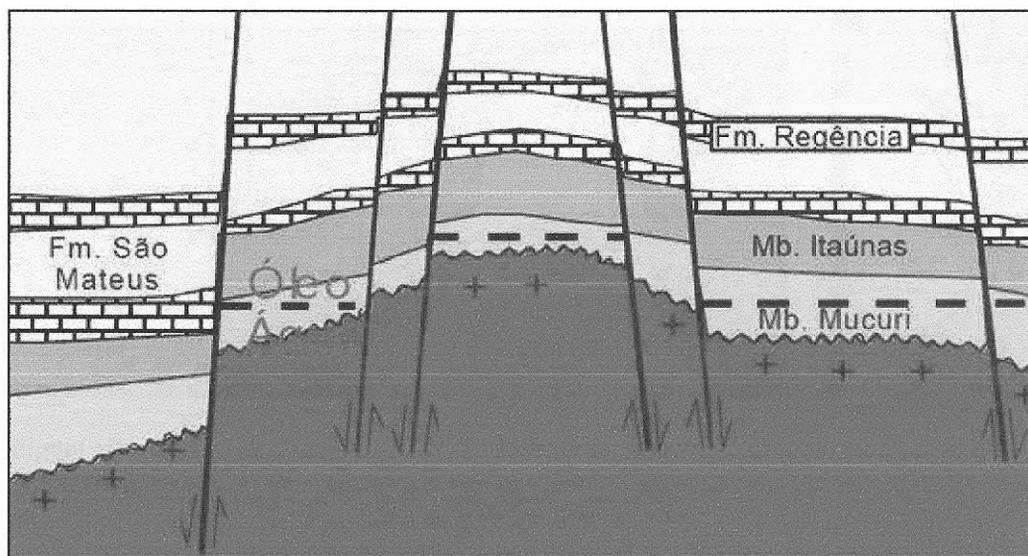


Figura 9 – *Esquerda: representação esquemática do Campo de Cação. No canto direito superior: Área de ocorrência do Play Barra Nova. (FONTE: Petrobrás, Marília Rodrigues de Castro, ANP).*

(iii) Regência-Urucutuca (Play Urucutuca)

O sistema petrolífero Regência-Urucutuca tem como geradoras os folhelhos da Formação Urucutuca; os calcários, folhelhos e margas da Formação Regência, e até os Folhelhos da Formação Cricaré. São calcilutitos e folhelhos calcíferos que ocorrem com espessuras reduzidas, da ordem de até 50 m, tendo conteúdo de carbono orgânico que alcança até 4%, e querogênio do tipo II e III. A migração ocorreu por contato lateral ou vias falhas e superfícies de discordância (BIZZI et al, 2003). Os reservatórios são os arenitos turbidíticos da Formação Urucutuca, onde os folhelhos desta mesma formação selam os reservatórios. As trapas são estratigráficas (*Pinch-outs* de turbiditos) e truncamentos contra os domos de sal na porção *offshore*, figuras 10 e 11. Engloba os campos de Cangoa, Peroá e Lagoa Parda.

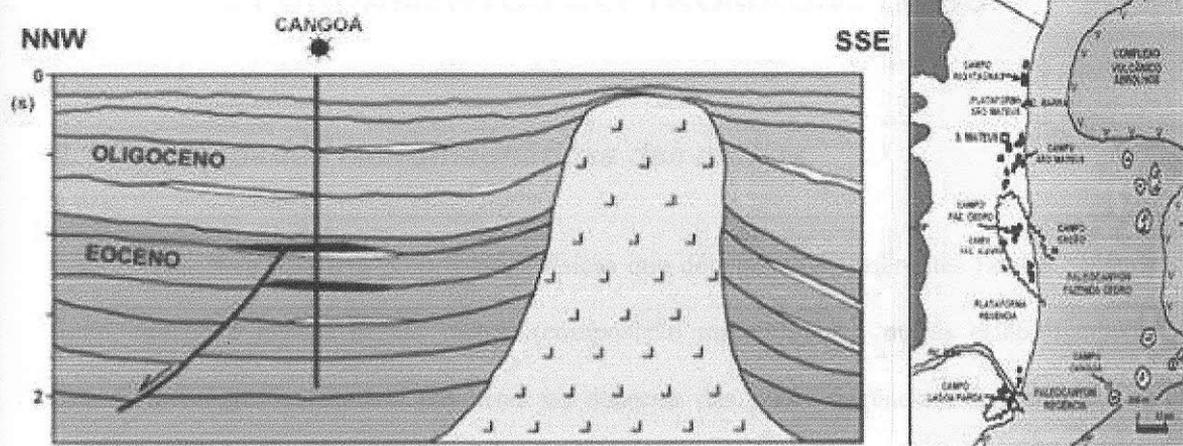


Figura 10 – Campo de Congoá. (FONTE: Petrobrás, Marília Rodrigues de Castro, ANP).

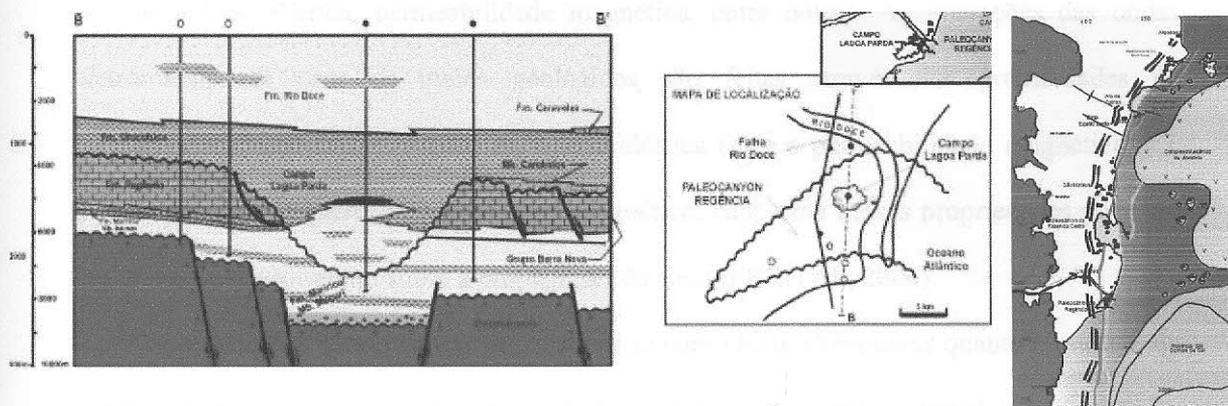


Figura 11 – Campo de Lagoa Parada. (FONTE: Petrobrás, Marília Rodrigues de Castro, ANP).

2 FUNDAMENTOS ELETROMAGNÉTICOS

2.1 Propriedades eletromagnéticas das rochas.

As rochas possuem propriedades físicas que dependem de diferentes fatores. Alguns estão ligados à gênese dessas rochas (composição mineralógica), outras estão ligadas à história geológica enfrentada por estas no decorrer das eras (diagênese). Dezenas são as propriedades físicas das rochas e enumerá-las aqui não faz parte do escopo desta monografia.

Algumas das propriedades medidas são: velocidade acústica, densidade, resistividade, permissividade elétrica, permeabilidade magnética, entre outras. As interações das ondas eletromagnéticas com os meios geológicos são feitas através das propriedades de condutividade elétrica (σ), a permissividade elétrica (ϵ) e a permeabilidade magnética (μ). Dependendo da frequência do sinal eletromagnético, cada uma dessas propriedades pode ter um maior ou menor efeito sobre a propagação do sinal (FREITAS, 2004).

Os métodos eletromagnéticos mostram-se como boas alternativas quanto à questão de auxílio à sísmica, uma vez que a resistividade elétrica tem um amplo intervalo de variação na ordem de magnitude, enquanto que a velocidade sísmica e a densidade das rochas variam no máximo em duas ordens de magnitude (JOSÉ, 2005), e também por serem independentes das propriedades elásticas do meio, novas informações, distintas da sísmica, serão trazidas ao final de uma prospecção eletromagnética.

Estas propriedades eletromagnéticas são, em geral, independentes das propriedades mecânicas (elásticas) do meio. Contudo a permissividade elétrica e a condutividade elétrica são fortemente afetadas pelo conteúdo fluido no meio, e, portanto, pela porosidade, fraturas e tipo de fluido no meio.

Por esses fatores também afetarem as propriedades mecânicas do meio, uma correlação entre parâmetros eletromagnéticos e mecânicos pode ser observada em alguns casos particulares, especialmente quando a porosidade e a saturação do fluido são moderadas a altas (FREITAS, 2004). Uma rocha intrusiva tende a ter baixa porosidade, assim tende a ter alta resistividade. Quanto mais compactada a rocha sedimentar, menor a proporção de poros e a resistividade tende a crescer.

Devido à dependência da resistividade dos fluidos contidos nos poros, que pode ser relacionado com o tipo de rocha, investigações nas variações da condutividade através da subsuperfície provem uma visão geral da litologia regional e potencialmente a presença de regiões falhadas ou fraturadas no fundo marinho. A temperatura das subestruturas também tem influência significativa na resistividade. O gradiente geotermal, que pode variar regionalmente, dependendo das condições tectônicas, pode contrabalancear o efeito da compactação (LEWIS, 2005).

É importante destacar as propriedades da coluna d'água, que por ter baixa resistividade (aproximadamente $0,3 \Omega.m$), tende a filtrar as altas frequências dos sinais eletromagnéticos. A alta condutividade da água marinha afastou por muito tempo o emprego dos métodos eletromagnéticos, uma vez que a energia eletromagnética gerada se atenua e muda de fase fortemente ao longo da camada líquida (SAMPAIO, 2004). Mas com a tecnologia, hoje esse cenário está mudando, e os levantamentos eletromagnéticos estão ficando mais constantes na indústria petrolífera.

2.2 Princípios Físicos (Equações de Maxwell).

A seção a seguir é derivada do Capítulo 1 de FREITAS (2004).

Para uma interpretação concisa de dados eletromagnéticos faz-se necessário o conhecimento de como os campos elétrico e magnético interagem com as rochas e seus minerais e fluidos constituintes.

Todos os fenômenos eletromagnéticos são governados pelas equações empíricas de Maxwell. As equações de Maxwell são equações diferenciais lineares de primeira ordem desacopladas, mas podem ser acopladas pelas relações constitutivas que reduzem os números de funções de campos vetoriais básicas de cinco para duas (WARD & HOHMANN, 1987).

Maxwell mostrou, por meio de suas equações, que este distúrbio eletromagnético, ao se propagar, deveria apresentar todas as características de um movimento ondulatório. Portanto, de acordo com Maxwell, esta radiação eletromagnética deveria sofrer reflexão, refração, espalhamento e interferência, exatamente como acontece com uma onda. Por este motivo, o distúrbio constituído pela propagação de campos elétricos e magnéticos foi denominado uma Onda Eletromagnética (FREITAS, 2004).

As leis básicas da eletricidade e do magnetismo podem ser resumidas na forma diferencial pelas quatro equações seguintes:

<i>Lei de Coulomb</i> (1)	$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$
<i>Lei de Ampère</i> (2)	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}$
<i>Lei de Faraday</i> (3)	$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$
<i>Ausência de pólos magnéticos livres</i> (4)	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$

Onde \vec{D} é o vetor deslocamento elétrico, ρ é a densidade de carga-fonte, \vec{H} é o vetor campo magnético, \vec{J} é o vetor densidade de corrente, \vec{E} é o vetor campo elétrico e \vec{B} é o vetor indução magnética.

Mas a equação da lei de Ampère não está correta. Ela foi deduzida para fenômenos com conceitos estacionários, onde $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$. Maxwell então substituiu a corrente \vec{J} na lei de Ampère pela sua generalização,

$$\vec{J} \rightarrow \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (5)$$

no caso de campos dependentes do tempo. Assim a lei de Ampère fica,

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (6)$$

O conjunto das quatro equações,

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 & \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 & \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (7) \text{ e } (8)$$

conhecidas como as Equações de Maxwell forma a base de todos os fenômenos eletromagnéticos clássicos (FREITAS, 2004).

O MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

3.1 Teoria magnetotelúrica

3.1.1 Conceitos básicos

O capítulo a seguir é derivado do Capítulo 3 de Lewis (2005).

O método magnetotelúrico (MT) utiliza como fonte de energia as variações naturais no campo magnético terrestre em períodos que vão desde 0,001 até 100.000 segundos e as tempestades de raios, que tipicamente resultam em frequências maiores que 1Hz. As variações temporais no campo magnético terrestre induzem campos elétricos correspondentes, dependentes das condutividades das estruturas em subsuperfície. O método MT é um modo de determinar a distribuição da condutividade elétrica da subsuperfície, através de medidas dos campos elétricos e magnéticos transientes naturais (VOZOFF, 1972).

A física do método envolve as equações de difusão e a resolução é menor que os métodos baseados na equação da onda (sísmica, GPR), porém, as grandes faixas de períodos que podem ser utilizadas fazem o método ser sensível a estruturas a poucos metros do fundo marinho até profundidades maiores que 100 km (KEY, 2003). Então, medindo um grande espectro dos campos elétricos e magnéticos é possível inferir a condutividade da terra em função da profundidade. A profundidade de penetração é consequência natural da frequência utilizada.

Nas frequências utilizadas no MT (0,0001-10Hz), a fonte é gerada na magnetosfera terrestre onde as interações complexas dos ventos solares com o campo geomagnético gera ondas hidromagnéticas, ou plasma (KEY, 2003). Em uma terra condutora, mudanças no campo magnético induzem correntes telúricas (*eddy*) e voltagens (VOZOFF, 1972).

As ondas eletromagnéticas geradas praticamente se propagam como ondas planas na atmosfera. Na superfície terrestre a maior parte da energia é refletida para a atmosfera ou dissipada como calor, assim apenas uma pequena parcela penetra verticalmente no substrato.

Sempre que ocorrer contraste de resistividade ocorrerá a geração de campos magnéticos secundários, cujas as intensidades estarão ligadas a estes contrastes (Figura 12). Os resultados interpretados são comparados com outros resultados, como perfis de indução em poços. A interpretação MT nos fornece valores reais de resistividades e profundidades verdadeiras, não apenas anomalias, sendo mais definitivo que dados gravimétricos e magnetométricos (VOZOFF, 1972).

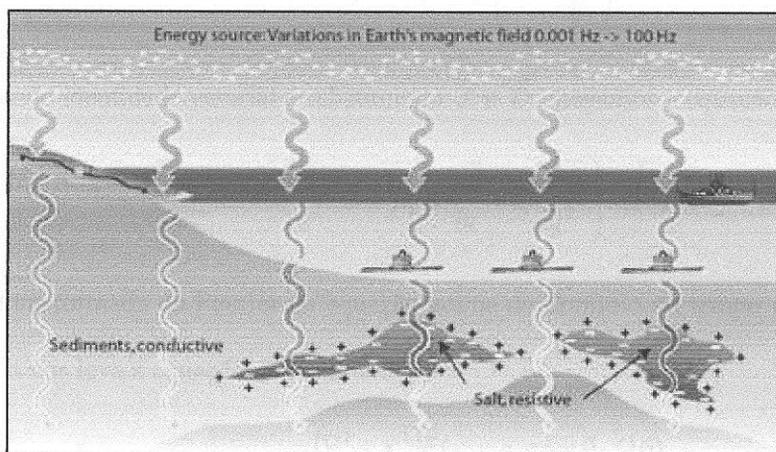


Figura 12 – Esquema de como são registrados os campos MMT. Os receptores são colocados no fundo marinho. FONTE: Scripps Institution of Oceanography.

As equações que governam o método magnetotelúrico, partem das equações de Maxwell escritas abaixo.

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \end{array} \right. \quad (9) \text{ e } (10)$$

Para um meio isotrópico e homogêneo, podemos aplicar as relações constitutivas lineares:

$$\begin{aligned}\bar{D} &= \varepsilon \bar{E}, \\ \bar{B} &= \mu \bar{H}, \quad (11); (12); \text{ e } (13). \\ \bar{J} &= \sigma \bar{E},\end{aligned}$$

onde ε é a permissividade dielétrica, μ é a permeabilidade magnética e σ a condutividade elétrica. Substituindo estas relações nas equações de Maxwell, e tomando o rotacional chegamos a:

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{E}) = -\mu \left(\nabla \times \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \right). \quad (14)$$

Usando identidade vetorial e substituindo \bar{J} e \bar{D} chegamos a equação da onda.

$$\nabla^2 \bar{E} = \mu \left(\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \right). \quad (15)$$

A transformada de Fourier da equação acima do domínio do tempo para o domínio da frequência nos leva a equação de Helmholtz,

$$(\nabla^2 + \kappa^2) \bar{E}(x, y, z, \omega) = 0, \quad (16)$$

onde ω é a frequência angular e κ é o número de onda complexo ou constante de propagação, que é função das propriedades do meio, dado por:

$$\kappa = \omega \left[\left(\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega} \right) \mu \right]^{1/2}. \quad (17)$$

3.1.2 Aproximação quase-estática

É considerado que as correntes condutivas no interior da terra são muito maiores que as correntes de deslocamento, ou seja,

$$\sigma \gg \omega \epsilon. \quad (18)$$

Esta aproximação é baseada na premissa que o MT “trabalha” com frequências relativamente baixas para calcular as condutividades da terra, o que implica que a permissividade dielétrica ϵ pode ser desprezada. Assim, assumindo a aproximação quase-estática o número de onda κ pode ser reescrito como:

$$\kappa = (\sigma \mu \omega)^{1/2} e^{-i\pi/4} \quad (19)$$

Considerando que isso seja verdadeiro, as equações da onda do MT podem ser reescritas como:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{E} &= \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \nabla^2 \vec{H} &= \mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \end{aligned} \quad (20) \text{ e } (21)$$

A remoção da segunda derivada leva o MT do regime da equação da onda para o regime da difusão. Se a energia eletromagnética propagar no modo descrito acima e se as magnitudes das correntes forem verdadeiras, podemos resolver a equação de Helmholtz como uma equação diferencial ordinária dada por:

$$E_x(z) = E_0 e^{+i\kappa z} \text{ e } H_y(z) = H_0 e^{+i\kappa z} \quad (22) \text{ e } (23)$$

onde E_0 e H_0 são os valores do campo em $z = 0$.

Isto significa que a profundidade de penetração do sinal MT é função da frequência do sinal e da condutividade do material atravessado, chegando, então, na equação do *skin depth*:

$$z = \delta = \left(\frac{2}{\sigma \omega \mu} \right)^{1/2} \text{ ou } \delta \cong 0.5 \sqrt{\rho T} \text{ (km)}, \quad (24) \text{ e } (25)$$

onde $T=1/f$ define a profundidade na terra cuja as amplitudes incidentes E_0 e H_0 reduzem exponencialmente para $1/e \approx 37\%$ da sua força na superfície (LEWIS, 2005).

3.1.3 Ondas planas

Como as fontes do MT estão a longas distâncias da superfície da terra podemos assumir que estas ondas planas se propagam praticamente perpendiculares à superfície. Com alguma aproximação, para a grande maioria das situações geológicas de interesse na prospecção petrolífera, podemos tratar o sinal MT como ondas planas, pois, o grande contraste de resistividade entre a atmosfera terrestre e a superfície terrestre impõe que as ondas eletromagnéticas se propagem verticalmente para subsuperfície, independente da origem na ionosfera.

3.1.4 Caso 1-D

A razão entre o campo elétrico e magnético determina a impedância superficial Z . Escolhendo $E(\omega) = E_x$ e $H(\omega) = H_y$ para um semi-espaco homogêneo, a relação desta impedância é:

$$Z_s = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\omega\mu}{\kappa} = \left| \frac{E_x}{H_y} \right| e^{i\phi_z}, \quad (26)$$

onde ϕ_z é o valor da fase da impedância. Incorporando esse resultado na equação do número de onda κ , o resultado anterior pode ser reescrito como:

$$Z_s = (\omega\mu_0\rho)^{1/2} e^{i\pi/4} \quad \text{ou} \quad \rho_a = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_s|^2 \quad (27) \text{ e } (28)$$

Como a permeabilidade magnética do vácuo μ_0 é assumida a mesma para todos os materiais na terra, a resistividade aparente, ρ_a , contém os efeitos de reflexão e atenuação de cada camada superimpostos. Quando as estruturas condutivas são dispostas na direção z (caso 1-D), viajando para baixo e para cima, a energia difundida deve ser levada em conta.

Estes efeitos devem ser levados em conta na equação da impedância elétrica na superfície Z_s em um modelo 1-D. A impedância Z_i no topo de cada camada i pode ser calculada pela equação recursiva,

$$\hat{Z}_i = Z_i \frac{\hat{Z}_{i+1} + Z_i \tanh(i\kappa_i h_i)}{Z_i + \hat{Z}_{i+1} \tanh(i\kappa_i h_i)} \quad (29)$$

onde h_i é a espessura da camada e Z_i é a impedância da camada i .

3.1.5 Modos TE e TM

Para o caso 2-D, a resistividade aparente é dependente da polarização da fonte de campo e das direções de medidas dos campos elétricos e magnéticos. A resistividade aparente para cada frequência varia lateralmente ou com a direção. Nós assumimos que existe um *strike*, mas não sabemos qual. Assim, E_x é devido parcialmente a H_x , mas também a correntes induzidas por H_y , que foi desviado por uma estruturação geológica qualquer. O mesmo vale para E_y . Assim, expandindo o tensor de impedância elétrica obtemos:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}. \quad (30)$$

Este tensor de impedância pode ser calculado se duas ou mais fontes de polarização estiverem presentes, onde a primeira se refere à direção do campo elétrico e a segunda a do campo magnético. Em uma estrutura condutiva 1-D,

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0 \text{ e } Z_{yx} = -Z_{xy} \quad (31) \text{ e } (32)$$

Em uma estrutura condutiva 2-D, que é o caso quando tanto o eixo x quanto o eixo y estão alinhados com o *trend* regional, então

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0 \text{ e } Z_{yx} \neq -Z_{xy} \quad (33) \text{ e } (34)$$

Os elementos de impedância Z_{yx} e Z_{xy} estão associados com os modos TE e TM respectivamente. A relação da resistividade aparente, dada anteriormente, pode ser reescrita para o caso 2-D como

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{xy}|^2, \quad (35)$$

Mas como E_y e H_x estão geralmente fora de fase, podemos definir a impedância de fase complexa como

$$\Phi_{xy} = \arctan\left(\frac{\text{Im}(Z_{xy})}{\text{Re}(Z_{yx})}\right). \quad (36)$$

Similarmente também equações para Φ_{yx} e ρ_{yx} . As impedâncias “fora” da diagonal no caso 2-D formam dois modos independentes: transverso elétrico (TE) e transverso magnético (TM). O modo TE utiliza o campo elétrico que é paralelo ao *strike* regional enquanto o modo TM usa o campo elétrico que é perpendicular ao *strike* regional. Estes dois modos também podem ser descritos por efeitos indutivos primários (TE) e efeitos galvânicos (TM).

3.2 Aquisição MMT marinha

Como descrito em LEWIS (2005), antes de realizar uma medida de resistividade no fundo do mar é necessário algumas considerações. Por atravessar a camada condutiva do mar os sinais de alta frequência são filtrados. Esta camada tem resistividade de aproximadamente $0.3 \Omega.m$, assim seu *skin depth* é aproximadamente 270 m no período de 1 s.

A profundidade de penetração das medidas de resistividade do método MT depende da condutividade do material em subsuperfície. Se este for sedimentar (mais condutor), o sinal MT se atenua fortemente e não penetra grandes profundidades. O inverso vale para o MT, embora a resolução a grandes profundidades seja baixa. KEY, 2003 mostra como a topografia atua causando uma fase negativa na resposta do TE e do TM. Esta correção deve ser muito bem elaborada em ambiente de talude marinho.

O desenvolvimento de um receptor banda-larga na década de 90 foi resultado direto do aumento da demanda de imageamento em subsuperfície dos contrastes de resistividade, em profundidades apropriadas para a exploração de petróleo (LEWIS, 2005). Neste trabalho estão descritos todos os componentes mecânicos e elétricos deste sistema.

O receptor colocado pelo navio nas coordenadas desejadas. Devido ao peso de uma ancora de concreto (Figura 13 e 14) o instrumento fica fixo no fundo marinho, e quando um comando é enviado através de sinal acústico o receptor retorna a superfície do mar através da liberação de um gás (Figura 15).

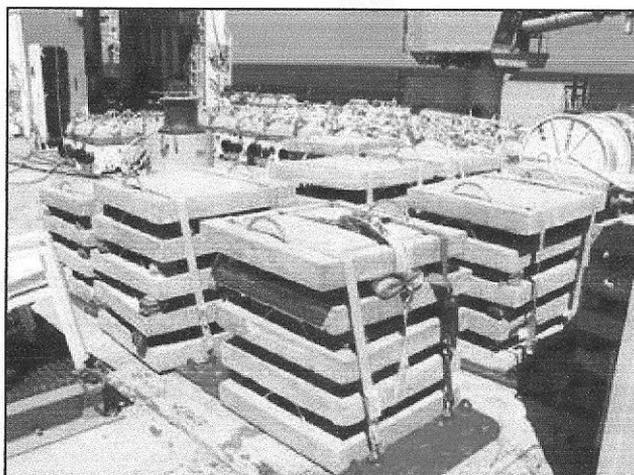


Figura 13 – Ancoras de concreto prestes a serem lançadas ao mar. No fundo é possível ver também os flutuadores. FONTE: Scripps Institution of Oceanography.

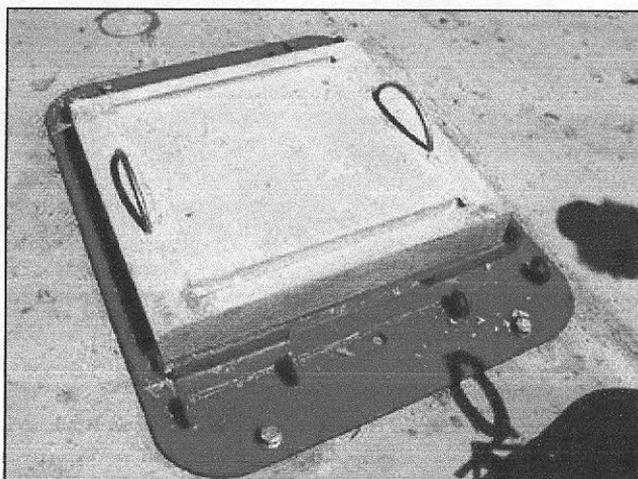


Figura 14 – Detalhe das anclas de concreto. FONTE: Scripps Institution of Oceanography.

Então, todos os registros das variações elétricas e magnéticas temporais são gravados em discos internos dos receptores para em seguida serem descarregados no retorno a superfície. Apesar dos receptores poderem ficar no fundo por cerca de dois meses, cerca de 36-72 horas de fundo são suficientes para o processamento de dados MT.

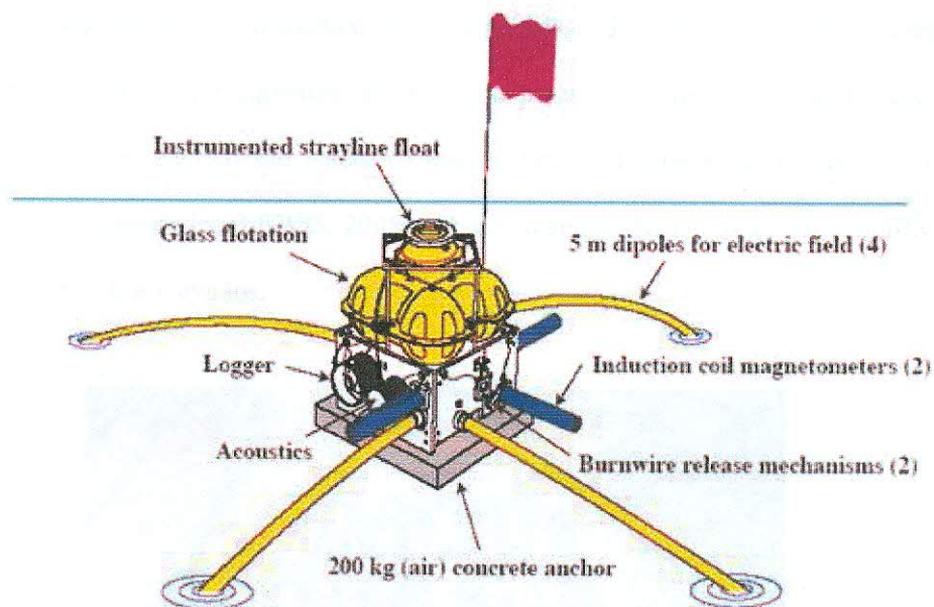


Figura 15 - Superior: Esquema do receptor moderno MMT. O componente amarelo na parte superior é o flutuador e a placa de concreto no fundo é a ancora.

Inferior : Equipamento sendo depositado. FONTE: Scripps Institution of Oceanography.

Existe um aspecto econômico envolvido no tempo que o receptor permanece no fundo do mar. Se a banda de frequências do levantamento for longa, maior deverá ser o tempo de registros e, conseqüentemente, os gastos envolvidos.

Os dados de campo magnético são coletados usando bobinas de indução magnética que são pressurizadas em recipientes com a mesma pressão do fundo marinho (Figura 16). Já os dados de campo elétrico são coletados usando braços dipolares semi-rígidos carregando eletrodos nas extremidades (LEWIS, 2005). Como os sinais são fracos, os pré-amplificadores não devem ter ruídos elevados.

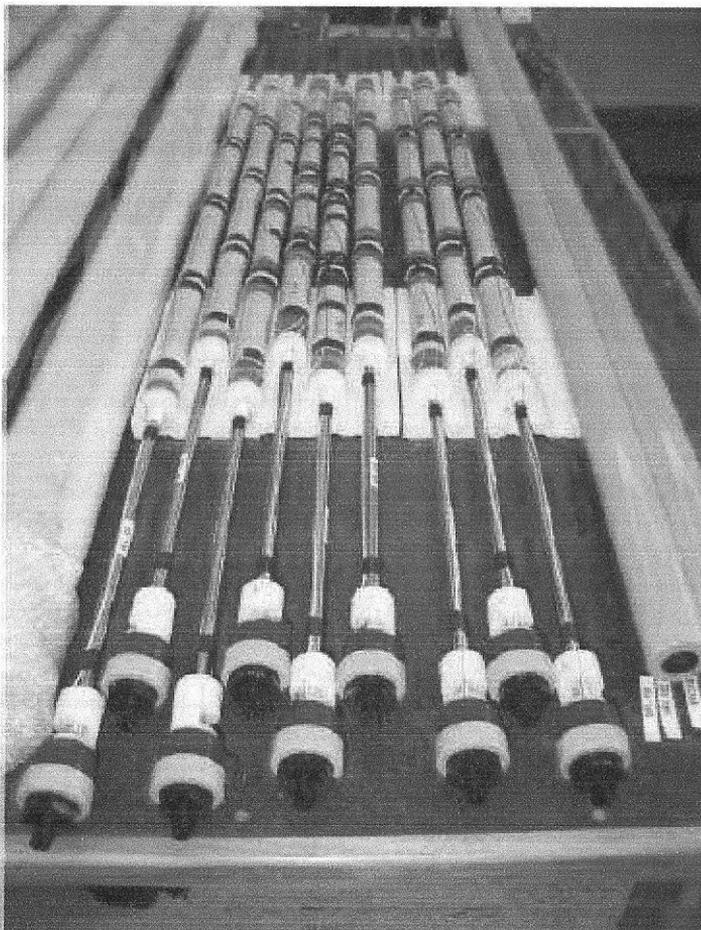


Figura 16 - Bobinas de indução magnética. FONTE: Scripps Institution of Oceanography.

3.3 Processamento de dados MT marinho

A seção a seguir é derivada do Capítulo 2 de KEY (2003).

O processamento das séries que levam ao tensor de impedância é referido como processamento de dados MT. Após as séries temporais elétricas e magnéticas temporais (Figura 17) terem sido coletadas, o tensor de impedância é estimado para cada local por frequências discretas e corretamente espaçadas. Os resultados deste processamento são as impedâncias e as resistividades aparentes, que em seguida são quantificadas através de modelos diretos e inversos.

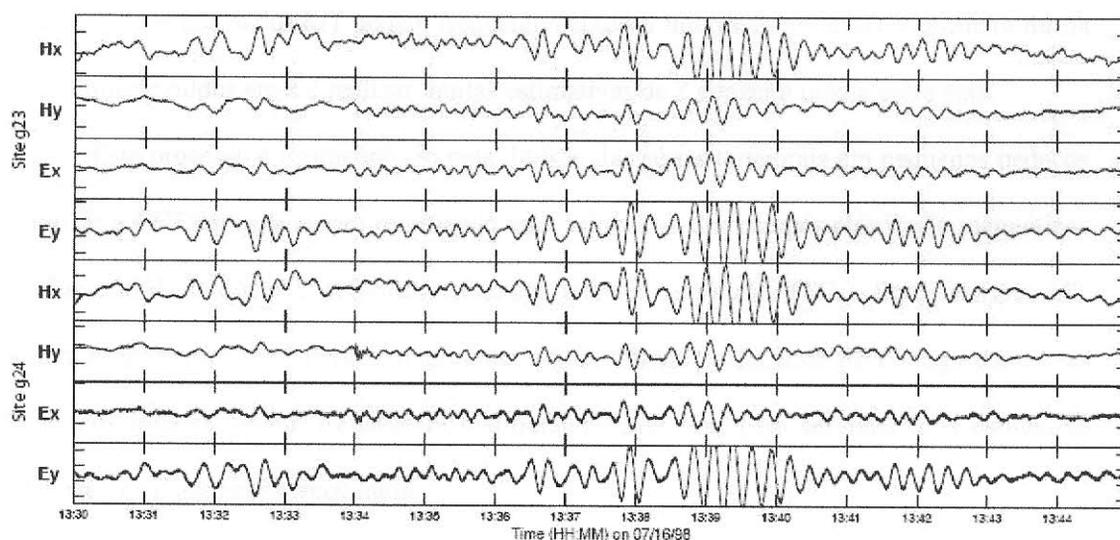


Figura 17 – *Séries temporais dos campos elétrico e magnético coletadas no prospecto*

Gemini, Golfo do México. FONTE: KEY (2003)

O fluxo do processamento de dados se inicia na captura dos dados dos receptores, em seguida as series temporais são avaliadas, são computadas as curvas de resistividade aparente e fase, passa pela rotação dos dados para as direções principais e finaliza com o algoritmo de inversão 2-D (LEWIS, 2005).

Os principais avanços do processamento de dados ocorreu nos últimos 20 anos. Segundo KEY (2003), o modo mais atual de processamento é uma rotina robusta de processamento multi-estações desenvolvida por EGBERT (1997; 2002, apud). Como a maioria dos levantamentos MT envolve a coleta de dados em múltiplas estações MT, a estimativa do tensor de impedância é melhor realizada utilizando informações de todos os canais de dados para discriminar sinal e ruído.

3.3.1 Domínio da frequência.

Trabalhando no domínio da frequência, o objetivo do processamento MT é uma estimativa do tensor de impedância Z , em diversas frequências da banda de interesse, livre de ruídos. Ruídos nos dados MT podem freqüentemente ser intermitentes, então a primeira forma de minimizar ruídos em Z é realizar muitas estimativas de Z e fazer a média entre elas.

Este processo é acompanhado pela divisão das séries temporais em pequenos pedaços e aplicar a *FFT* em cada seção, retornando uma estimativa dos campos elétricos e magnéticos no domínio da frequência, referidos como coeficientes de Fourier (FCs). Se os campos MT forem estacionários e não corrompidos por ruídos intermitentes, uma *FFT* longa das séries temporais inteiras podem fornecer FCs suficientemente bem para ser feita uma estimativa adequada de Z para cada frequência.

Mas o ruído pode ser intermitente e os campos fontes não-estacionários, então uma grande quantidade de FCs nos permite uma discriminação entre seções “boas” e “ruins” das series temporais. As impedâncias estimadas são usualmente desejadas sobre uma extensa faixa de frequências e esta técnica é conhecida como *cascade decimation* é utilizada.

A idéia básica da *cascade decimation* é maximizar o numero de FCs calculados em uma banda de frequência dada, assim permitindo campos de fontes não-estacionários e a minimização dos ruídos pelas médias. As séries temporais são divididas em pequenas janelas

que se sobrepõe e passadas para o domínio da frequência. O próximo passo é usar os FCs para formar uma estimativa real de Z .

Existem alguns métodos para esta estimativa. Até o final da década de 70 era utilizada a análise dos mínimos quadrados. Então, passou a se utilizar a análise de referência remota para estimar Z . Esta técnica melhorou muito os efeitos dos ruídos nos componentes magnéticos.

A técnica da referência remota utiliza medidas de H em um local remoto para reduzir os efeitos dos ruídos. Esta estação remota deve estar suficientemente longe para que os ruídos medidos no local remoto não sejam coerentes com os ruídos medidos nas estações, mas suficientemente perto para que a fonte de campo magnético seja uniforme, entre a referência remota e as estações de medida KEY (2003).

Atualmente, é utilizada a rotina de estimação da função de transferência multi-estação, que não necessita uma estação terrestre remota de transferência.

3.3.2 Deslocamento estático (*static shift*).

Segundo JONES (1988), o deslocamento estático dos dados MT é o ponto fraco que impede uma maior aceitação e a aplicação do método MT, não somente para interesse acadêmico, mas também para interesses comerciais. Este efeito aparece como um deslocamento para cima ou para baixo nas curvas de resistividade aparente.

Os valores errôneos são os resultados da diferença de potencial entre o par de eletrodos que, não representam muito bem as medidas errôneas na componente horizontal do campo elétrico terrestre, e geralmente está associada a cargas superficiais. Uma característica deste efeito é que a fase do tensor de impedância não é afetada (Figura 18).

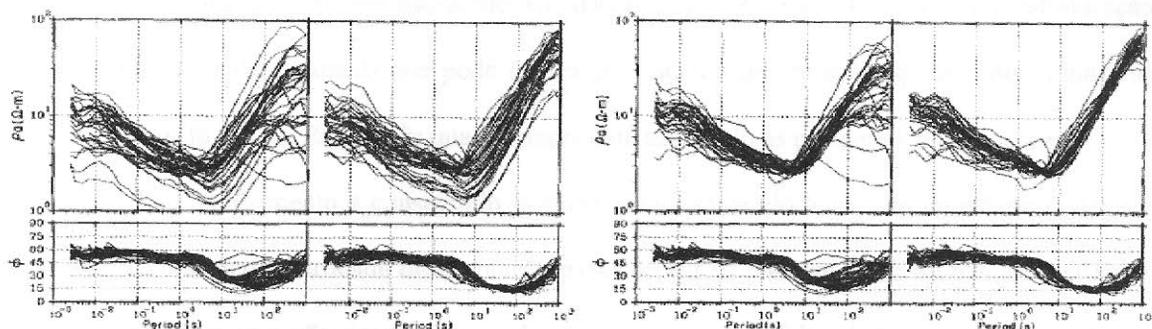


Figura 18 - Resultado da correção de distorção estática. Observar que a fase (gráfico inferior) não é afetada significativamente por este efeito. FONTE: Jones, 1988.

Geralmente ocorrem quando as camadas superficiais são altamente resistivas. O efeito do deslocamento estático, e a sua remoção, tem sido estudado exhaustivamente (JONES, 1988; SINGER, 1992; OGAWA, 2002; TOURNERIE, 2004 *apud*).

A correção realizada apenas através do método de inversão 2-D por estrutura mínima pode resultar em soluções imprecisas, pois as correlações laterais entre linhas não podem ser garantidas. Uma solução é a combinação de diversos métodos como TEM e inversão suavizada. Filtragem espacial parece ser a solução mais apropriada, pois seus resultados podem ser facilmente aplicados a mapas de resistividade aparente 2-D (TOURNERIE, 2004).

3.3.3 Decomposição G-B.

Dado que as curvas de resistividade aparente e a fase podem variar significativamente com uma rotação angular do tensor MT, as diversas orientações são potencialmente um sério problema (LEWIS, 2005). Entretanto, sob certas condições isto aparenta ser o caso que as orientações dos pacotes não são importantes se o tensor MT for adquirido cuidadosamente. Estas condições são verdadeiras quando não existe um *strike* geoeletrico regional.

Mas quando existem não-homogeneidades locais, ou seja, quando há uma estruturação geológica (*strike* regional) que pode mascarar o cálculo da impedância, devemos alinhar as respostas do tensor. Este *strike* quase sempre está associado às principais falhas de uma bacia.

Este alinhamento é conseguido fazendo uma rotação do tensor de impedância. Alguns autores discutem a validade desta rotação para corrigir os resultados em ambientes marinhos. O argumento para não decomposição do dado é que se os efeitos batimétricos não puderem ser removidos, por exemplo, se a batimetria for 2-D, a inversão baseada no modelo marinho não irá inverter corretamente. Este argumento tem seu mérito para o caso 2-D, mas não terá sentido se for 3-D (LEWIS, 2005). Diagramas polares mostram o dimensionamento de cada estação com a frequência.

O método de decomposição G-B tenta reduzir os efeitos de distorções do tensor MT, forçando a impedância para um regime 2-D, onde $Z_{xy} = Z_{yx} = 0$ (LEWIS, 2005). Este processo tenta rotacionar cada estação até que o tensor de impedância tenha a máxima coerência, e os elementos diagonais Z_{xx} e Z_{yy} sejam minimizados. Esta aproximação assume uma terra com uma estrutura 2-D, sem contar nenhuma heterogeneidade superficial ou distorções locais. Um exemplo dos valores de impedância do tensor antes e depois da decomposição G-B pode ser visto na Figura 19.

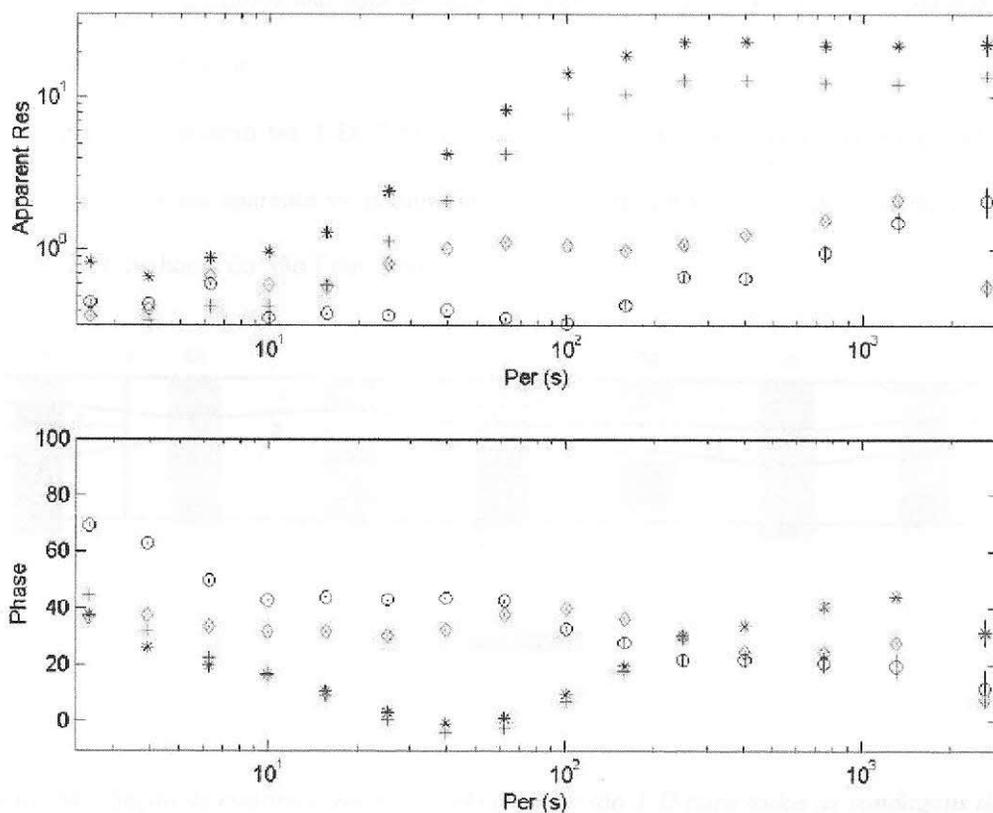


Figura 19 – Resultados da resistividade aparente e da fase antes e depois da decomposição

G-B. Escuro: Antes, claro=depois, estrelas=TE, círculos=TM. (FONTE: LEWIS, 2005)

3.3.4 Inversão dos dados.

O próximo passo após realizar, ou não, a rotação é a inversão dos dados. A inversão de dados de sondagens eletromagnéticas não nos leva a uma única solução. A aproximação padrão para solucionar problemas inversos não-lineares em aplicações MT usa sucessivas iterações e inversão linearizada (KEY, 2003). A maioria dos tipos de inversão usa expansão de Taylor de primeira ordem para prover uma perturbação no modelo de referência a partir da qual a nova resposta do modelo direto é calculada e comparada com o dado. Este processo iterativo continua até convergir para um valor de erro predeterminado. Um maior

detalhamento dos algoritmos não será apresentado nesta monografia e podem ser obtidos em *papers* focados neste tema.

As inversões podem ser 1-D, 2-D ou 3-D. Um dos resultados das inversões 2-D são seções de resistividade aparente vs. profundidade. A figura abaixo mostra o resultado de uma inversão 2-D na bacia do São Francisco.

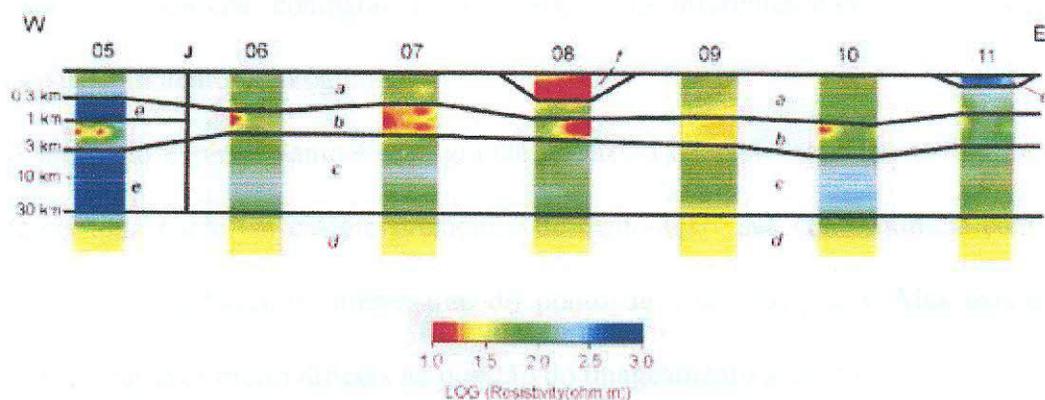


Figura 20 – Seção de continuidade resultante da inversão 2-D para todas as sondagens da bacia do São Francisco. As linhas pretas superimpostas aos modelos invertidos são os limites usados nos modelos diretos 2-D. A letra J corresponde a falha de João Pinheiro.

4 ESTUDO DE CASO

Diversos autores de todo o mundo vêm aplicando o método MT na exploração de petróleo. No Brasil, estes trabalhos são mais raros e, geralmente estes estudos são demasiadamente teóricos, comparando as resoluções de diferentes métodos geofísicos sob diferentes ambientes geológicos.

A Bacia do Espírito Santo é uma grande promessa na exploração petrolífera, pois além de ser uma bacia em estágio prematuro de exploração, sua conformidade com a bacia de Campos é bastante interessante do ponto de vista dos *plays*. Mas existem desafios exploratórios muito difíceis na questão do imageamento sísmico.

Neste momento é conveniente destacar que dentre as “áreas de difícil exploração” na bacia do Espírito Santo se encontram os paleocânions de Regência e Fazenda Cedro. A erosão santoniana, causadora dos paleocânions, é responsável por alguns altos paleogeomórficos (por exemplo, o campo de Cação) importantes na exploração. Nestes paleocânions os contrastes laterais de impedância somados a superfície erosiva são problemas a serem resolvidos pelos meios convencionais da sísmica. Os métodos eletromagnéticos (mais especificamente o MT) poderiam ser utilizados como complementos da sísmica nestas situações.

Também a porção sudoeste, próxima a região distal do alto de Vitória, existe uma notável província halocínética formada pelo colapso de diápiros de sal, que fecham o limite crustal. Esta região também é caracterizada como zonas de vulcanismo intrusivo e extrusivo (Costa, 2005). Esta autora cita que 90% da área prospectável da bacia encontra-se na plataforma continental, ou seja, em águas rasas. Devido à baixa cobertura sísmica nos *offsets* mais curtos, as águas rasas são zonas de difícil imageamento, o que se torna uma justificativa para o uso do MT marinho; entre outros.

4.1 O método MT no mundo.

Em um dos trabalhos clássicos a respeito do método MT, VOZOFF (1972) considera que capacidade e economicidade do MT justificam sua consideração para a avaliação de blocos ainda não explorados. A aplicação do método MT na exploração de petróleo, segundo este autor, é ligada aos estágios primários de reconhecimento ou em áreas de difícil exploração por meios convencionais da sísmica. Também descreve o embasamento cristalino de uma bacia, geralmente resistivo, como de fácil identificação.

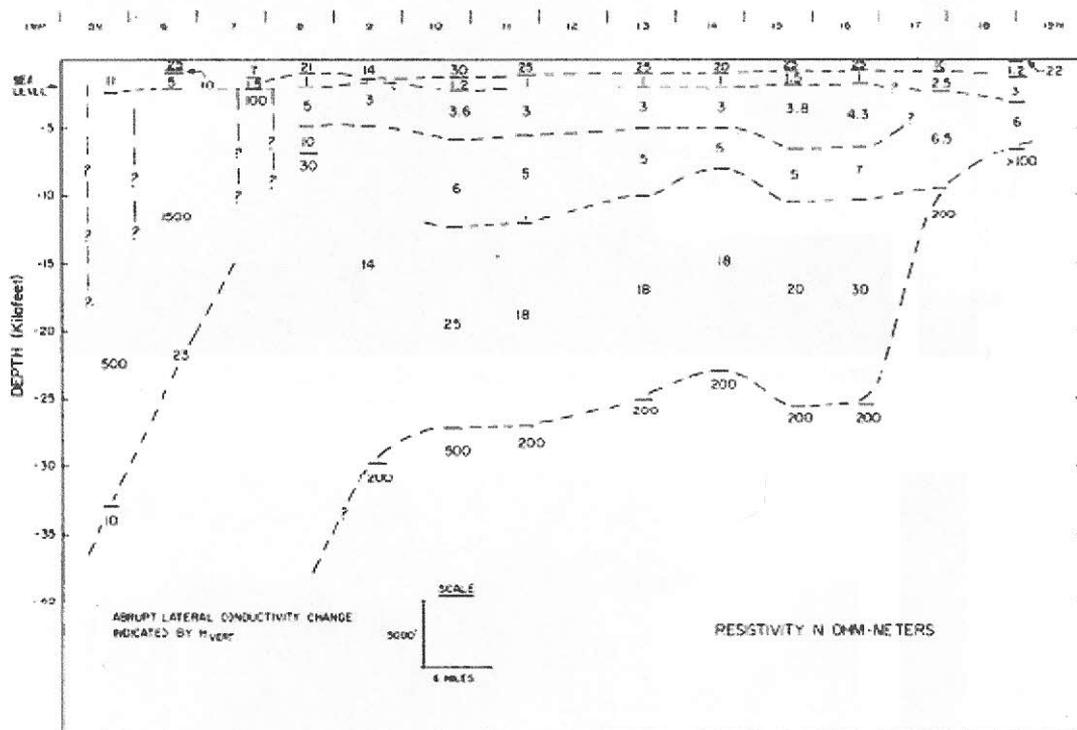


Figura 21 - Seção de resistividade aparente interpretada da bacia de Anadarko, Oklahoma. (FONTE: VOZOFF, 1972).

JONES (1988) sugere que o MT seja realizado junto com dados sísmicos como complemento à identificação dos horizontes de reflexão. Também menciona o fato do MT ser sensível a variações laterais de condutividade, sendo muito bom para mapear zonas de falhas. Como VOZOFF (1972), este autor também menciona o fato do MT ser importante para avaliar grandes estruturas e inícios de exploração.

KEY (2003) mostrou o mapeamento e a delimitação de estruturas 3D de sal, através da sobreposição de seções sísmicas sobre seções MT (Figura 22 e 23). Como pode ser visto nestas figuras nas regiões mais profundas é necessária uma inversão 3D para melhor resolver estes corpos. As ambigüidades da base do sal, onde as reflexões sísmicas são incoerentes, podem ser resolvidas com uma interpretação conjunta dos dois tipos de dados

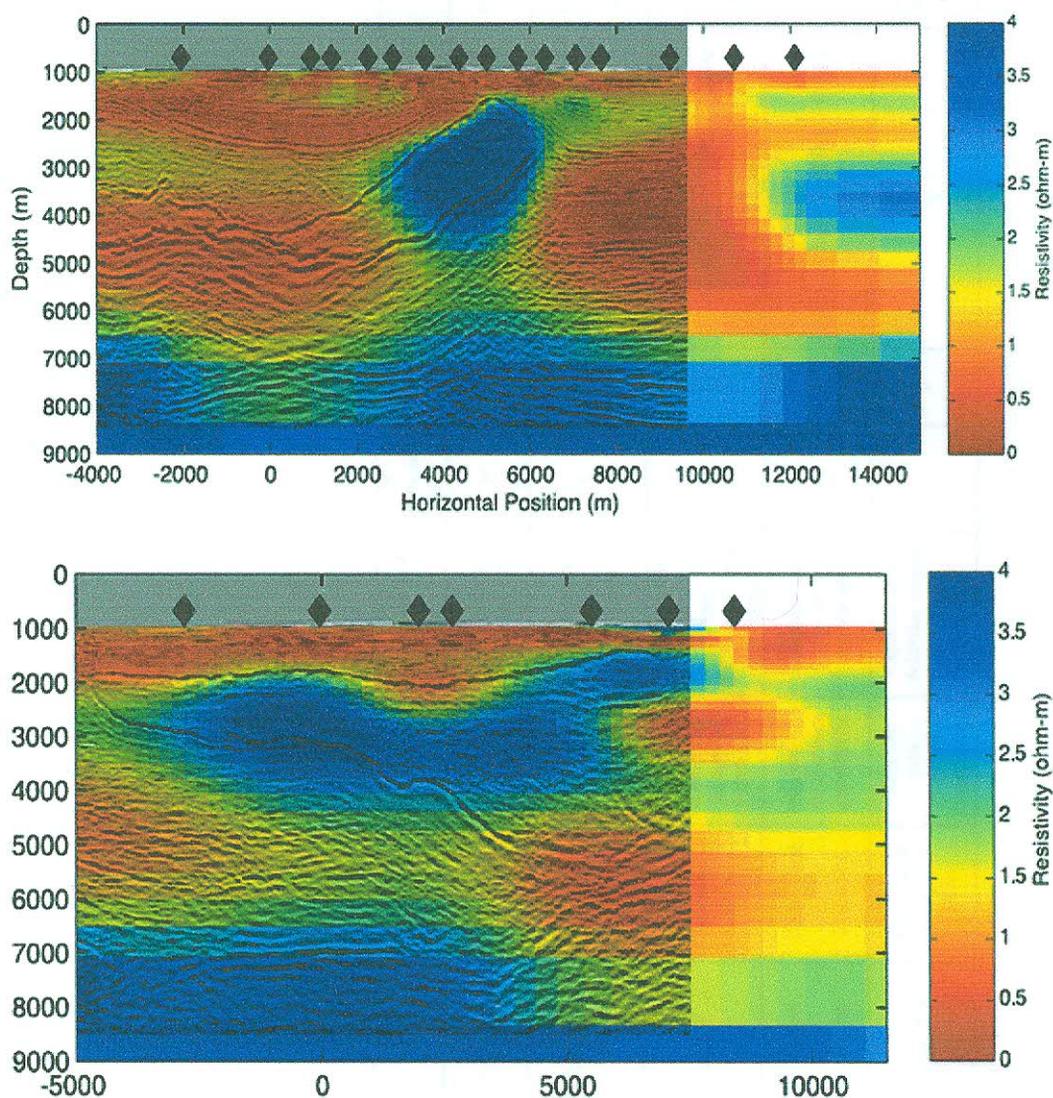


Figura 22 – Combinação entre seções sísmicas e magnetotelúricas. Podemos observar que a base do sal não é bem mapeada, sendo necessária uma inversão 3D.

(FONTE: KEY, 2003).

4.2 O método MT no Brasil.

A tabela abaixo mostra alguns levantamentos MT realizados no Brasil, com a parametrização da aquisição e os principais resultados. Cada autor descrito abaixo descreve a maneira ideal de aplicação do MT.

Autor	Ano/Local	Objetivo	Expectativas de respostas	N. Estações MT	Perfis	Espalhamento	Faixa de Frequência	Resultados
Lugão et al	2001/Caldas Novas DF	Origem das águas termais.	Temperatura e permeabilidade	25	2	5 km	0.008 - 176 Hz Utilizou apenas 0.01 - 61 Hz	A inversão mostrou a estruturação
Travassos & Meneses	2002/ Bacia do São Francisco	Fornecer um modelo regional antes da sismica	Embasamento resistivo estruturado	7	1	30 km	0.001 - 1000 Hz	Embasamento mais profundo que os modelos anteriores
Costa, F. A.	2005/ Bacia do Espírito Santo	Caracterizar e delimitar as faixas estruturais.	Embasamento resistivo e zonas cataclásicas mais condutoras.	23	1	10 km	0.003 - 300 Hz	Mapeamento do limite cristalino/bacia, condutores e falhas importantes.
Porsani & Fontes	2001/ Bacia do São Francisco	Mapeamento da estrutura geotérmica.	Embasamento resistivo estruturado	43	8	2.5 - 20 km	0.001 - 400 Hz	Delimitação da espessura de sedimentos, condutor profundo
José, S. A.	2005/ Bacia do Espírito Santo	Modelos para verificar resolução.	Capacidade de delimitar corpos abaixo de basaltos					Bom desempenho do MT onde existe as Vulcânicas de Abruços

Tabela 1- Alguns trabalhos aplicando o MT no Brasil

No trabalho do TRAVASSOS & MENEZES (1999), além de conseguir delinear o limite do pacote sedimentar, foi possível limitar a espessura da cobertura calcária da bacia. Estes autores também conseguiram correlacionar duas finas camadas condutoras a sedimentos paleozóicos e mesozóicos. Os sedimentos pelíticos, abaixo dos calcários, também foram contemplados (Figura 20). O contato entre o cráton do São Francisco e a Cinturão móvel Brasília (falha de João Pinheiro) foi delimitado em profundidades de até 60 km, se estendendo além do previsto (Figura 23).

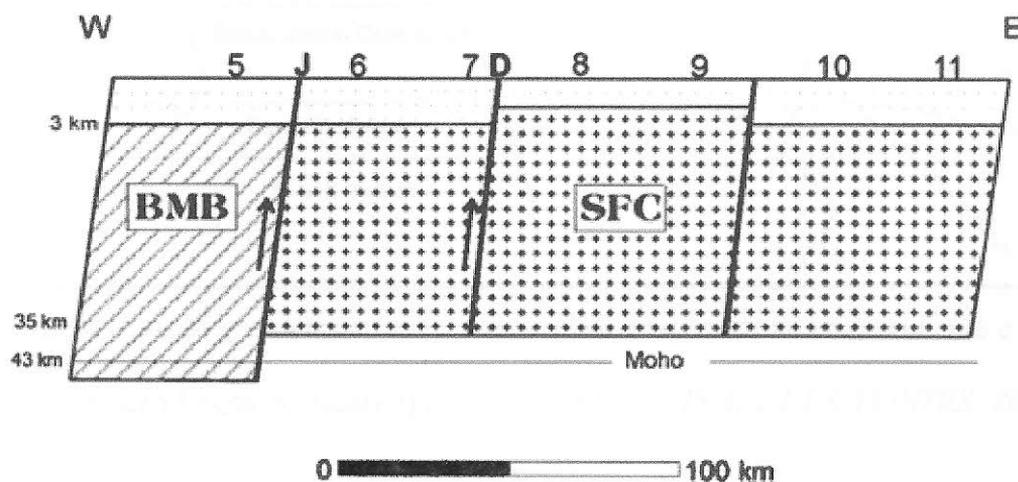


Figura 23 – Interpretação geológica da bacia do São Francisco. (FONTE: TRAVASSOS E MENEZES, 1999).

Porsani & Fontes (2001) discriminaram cinco horizontes geoeletricos (3 condutores e 2 resistivos), determinando a espessura dos sedimentos que preenchem a bacia de São Francisco e identificaram uma zona condutiva e outra resistiva a profundidades crustais.

Correlacionado horizontes geológicos, extraídos de um poço existente na área, e as seqüências condutivas e resistivas, a resposta obtida pela inversão apresentou apenas uma concordância razoável com o perfil de eletroresistividade do poço. A análise do conjunto de todos os resultados permitiu a construção de uma coluna estratigráfica associada aos parâmetros elétricos do meio (Figura 24).

No trabalho do TRAVASSOS & MENEZES (1999), além de conseguir delinear o limite do pacote sedimentar, foi possível limitar a espessura da cobertura calcária da bacia. Estes autores também conseguiram correlacionar duas finas camadas condutoras a sedimentos paleozóicos e mesozóicos. Os sedimentos pelíticos, abaixo dos calcários, também foram contemplados (Figura 20). O contato entre o cráton do São Francisco e a Cinturão móvel Brasília (falha de João Pinheiro) foi delimitado em profundidades de até 60 km, se estendendo além do previsto (Figura 23).

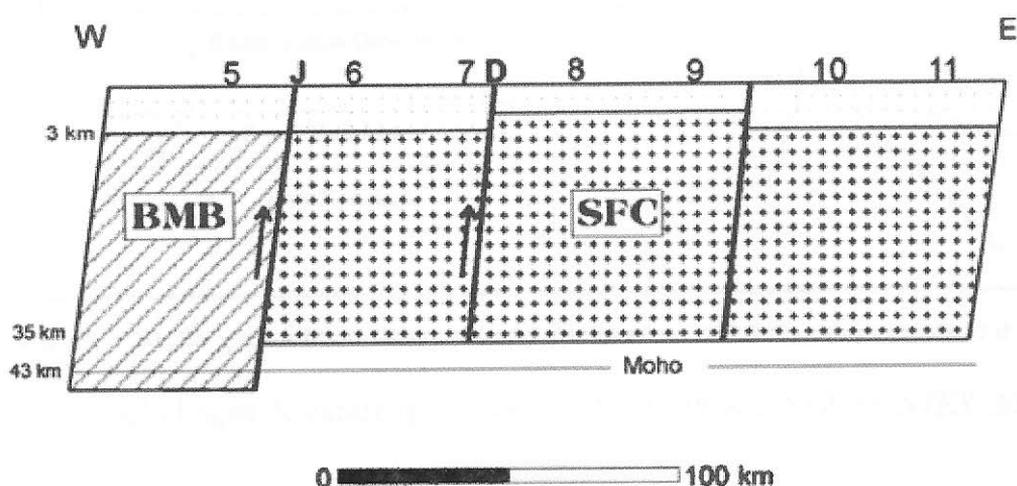


Figura 23 – *Interpretação geológica da bacia do São Francisco. (FONTE: TRAVASSOS E MENEZES, 1999).*

Porsani & Fontes (2001) discriminaram cinco horizontes geoeletricos (3 condutores e 2 resistivos), determinando a espessura dos sedimentos que preenchem a bacia de São Francisco e identificaram uma zona condutiva e outra resistiva a profundidades crustais.

Correlacionado horizontes geológicos, extraídos de um poço existente na área, e as seqüências condutivas e resistivas, a resposta obtida pela inversão apresentou apenas uma concordância razoável com o perfil de eletroresistividade do poço. A análise do conjunto de todos os resultados permitiu a construção de uma coluna estratigráfica associada aos parâmetros elétricos do meio (Figura 24).

Apesar dos horizontes se apresentarem contínuos, as inversões mostram variações de espessura. Foi possível mapear o embasamento geoeletrico, suas partes mais profundas e mais rasas.

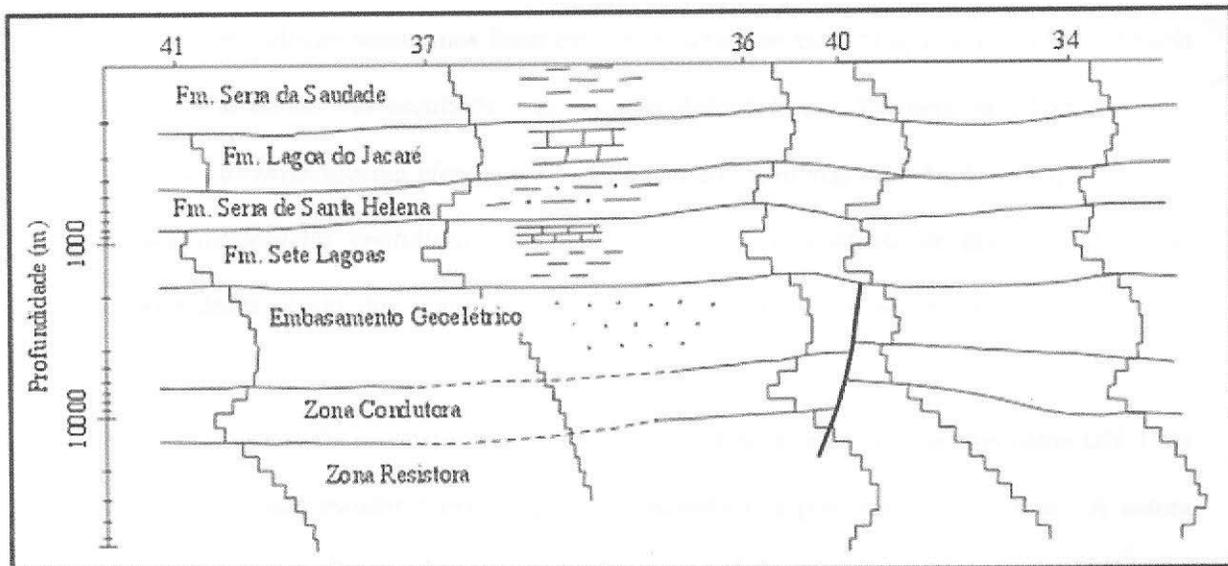


Figura 24 – Seção geoeletrica interpretada. Nota-se os altos no embasamento e a base da formação Lagoa do Jacaré (geradora). (FONTE: PORSANI & FONTES, 2001)

Jose (2005) mostrou que sob uma lamina d'água de 2000 m os resultados das modelagens MT apresentaram bem, já que devido à filtragem passa baixa, foi possível delinear os corpos em subsuperfície.

4.3 Investigações eletromagnéticas na porção continental da bacia do Espírito Santo e suas adjacências cristalinas. Dissertação de Mestrado de Flaviana de Almeida Costa (2005). Observatório Nacional.

Neste trabalho tentaremos fazer um breve estudo de caso da aplicação do MT na bacia do Espírito Santo. Foi escolhida a dissertação defendida por Flaviana de Almeida Costa, intitulada de *Investigações eletromagnéticas na porção continental da bacia do Espírito Santo e suas adjacências cristalinas*. Este trabalho, dentro do contexto de disponibilidade nas universidades, é um dos mais completos e aplicados sobre o método magnetotelúrico no Brasil.

Este estudo foi proposto pelo LENEP (envolvendo diversas instituições como ON, UnB e Petrobras) para estudar a evolução termomecânica e o potencial em petróleo. A autora contribui para o melhor conhecimento das feições tectônicas e estruturais da bacia do Espírito Santo.

Foram realizadas medidas MT e TEM ao longo de um perfil SE-NW de 150 km de extensão, totalizando 23 estações MT com espaçamento médio de 10 km, com direção praticamente perpendicular à direção estrutural. Este perfil cortou as cidades de Linhares, Colatina e Baixo Gandu (Figura 25). Um detalhe é que o final do perfil foi desviado para norte devido à logística. Isso foi uma perda muito grande porque não atravessou o Paleocânion de Regência.

Resumidamente, neste trabalho são apresentados os resultados encontrados nas modelagens dos dados MT e a sua interpretação associada a dados magnetométricos e geologia de superfície.

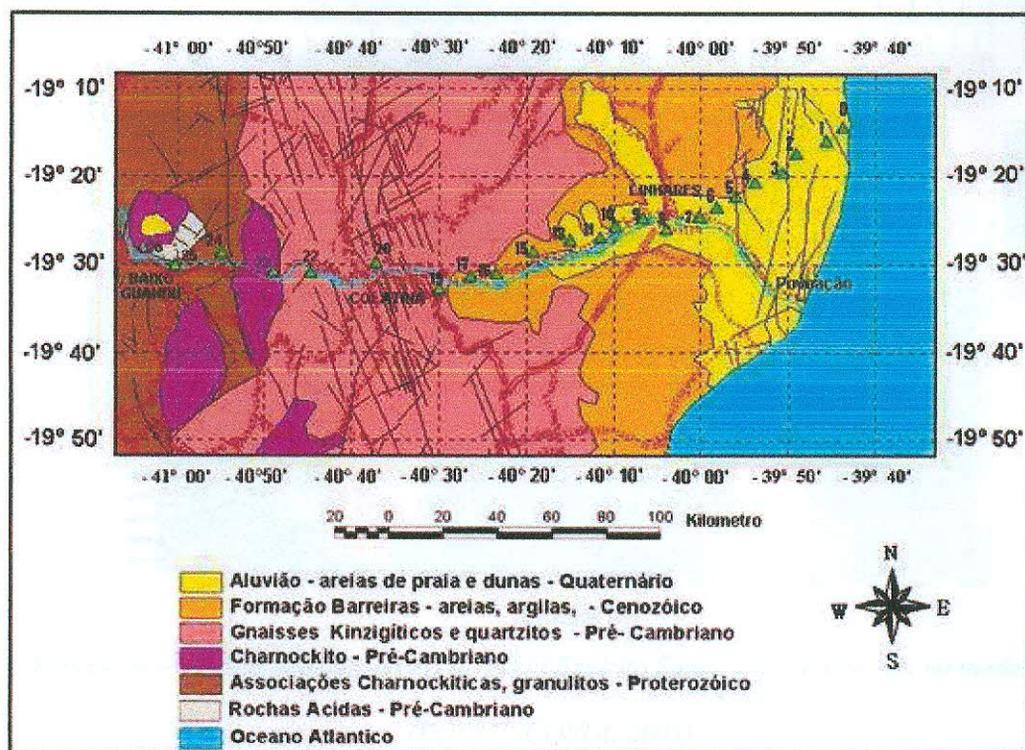


Figura 25 - Mapa de localização da área de estudo sobreposto ao mapa geológico. Costa (2005). Percebe-se que na porção leste do perfil ocorre um desvio para nordeste das estações MT. (FONTE: COSTA, 2005)

As figuras 26 e 27 são os modelos geoeletricos 2D (modos TE e TM), que delimitam as feições geológicas na transição entre a porção continental da bacia do Espírito santo e o cristalino. Foi também obtido um modelo a partir da inversão conjunta (modos TE e TM), qual é mostrado na figura 28.

Os efeitos mais marcantes aparecem nos três modelos gerados, o que proporciona consistência às feições observadas. Entretanto, as feições estruturais são mais bem definidas no modelo TM, o que era previsto visto que este é perpendicular ao *strike* regional.

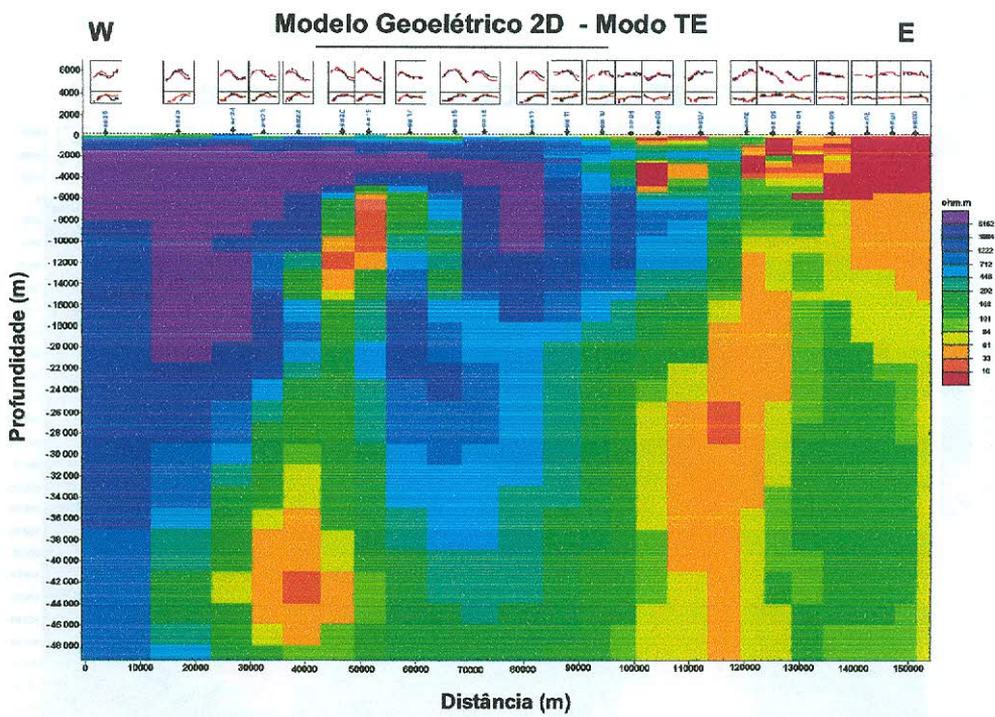


Figura 26 – Modelo geométrico 2D do perfil Espírito Santo – Baixo Guandu no modo TE.

(FONTE: COSTA, 2005)

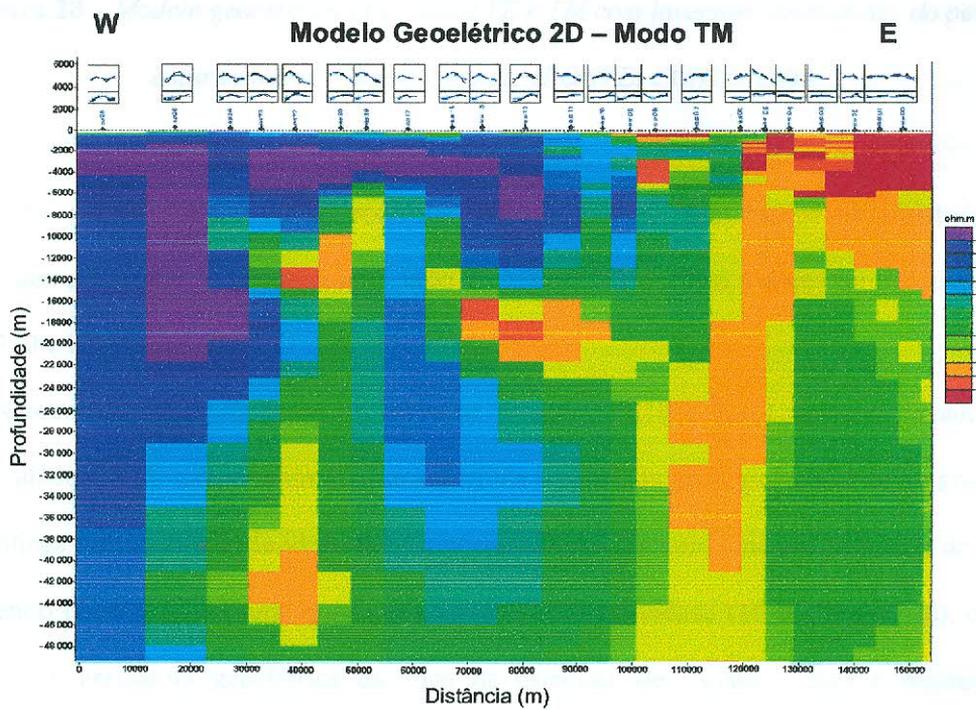


Figura 27 – Modelo geométrico 2D do perfil Espírito Santo – Baixo Guandu no modo TM.

(FONTE: COSTA, 2005)

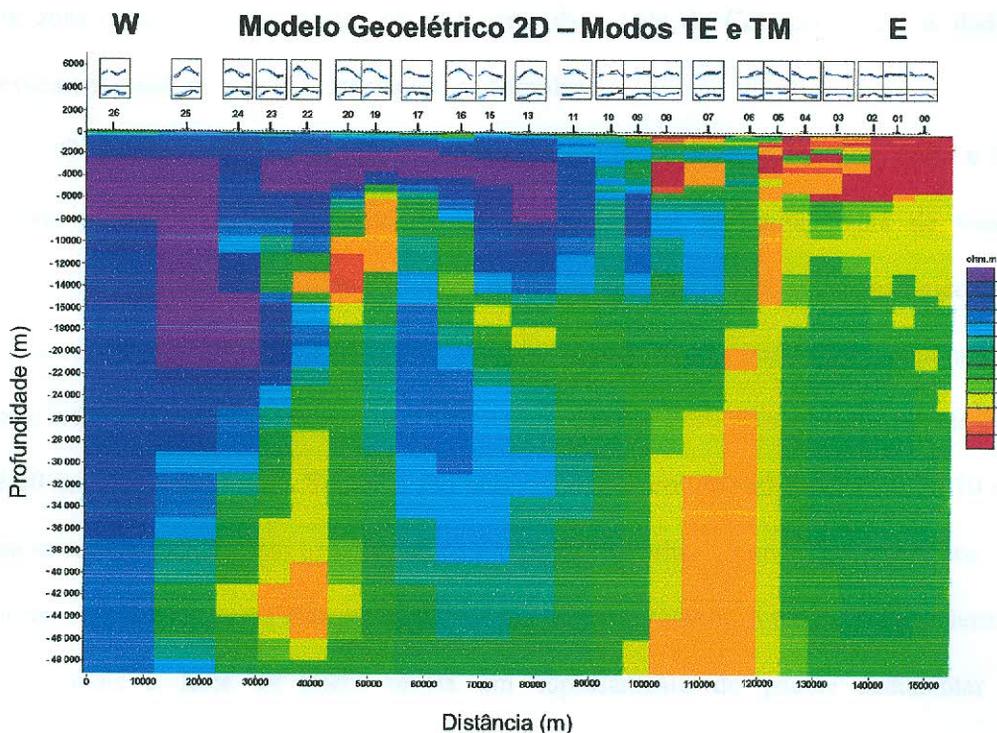


Figura 28 – Modelo geoelétrico 2D (modos TE e TM com inversão simultânea) do perfil Espírito Santo – Baixo Guandu. (FONTE: COSTA, 2005)

Na porção mais a oeste, podemos observar valores mais baixos de resistividade, associados ao manto de intemperismo indo de 100 a 200 m, com valores de resistividades entre 100 e 200 ohm.m.

Observa-se, nas três imagens, entre as estações ES19 e ES23 valores elevados de resistividades (1000 a 6000 ohm.m) que superfície é mapeada geologicamente como gnaisses kinzigíticos e quartizíticos de idade Pré-Cambriana. Estas atingem uma profundidade de até 2 km, sendo observada daí uma queda nos valores de resistividade (10 a 700 ohm.m), o que confirma a assinatura geoelétrica da zona de cataclase de Colatina, com o registro de falhamentos nas direções NW e SE, entretanto estes falhamentos não chegam a superfície neste perfil. O modo MT mostra melhor este resultado, já que foi realizado transversalmente a

esta zona. Mas os dados foram obtidos perto da cidade de Colatina, onde os dados se apresentam ruidosos e com comportamento complexo.

O contraste de resistividade observado na figura 28 entre as estações ES09 e ES13, permite identificar o limite oeste da porção continental da bacia (faixa de transição bacia/cristalino), que se encontra deslocada do limite apresentado no mapa geológico (ES15-ES17), registrando a presença de rochas alteradas possivelmente associadas a fraturamentos. Neste local, as resistividades assumem valores entre 200 e 3000 ohm.m, mantendo esta faixa até 10 km de profundidade. Também são observados valores de resistividade entre 10 e 200 ohm.m correspondentes aos sedimentos da Formação Barreiras e aluviões quaternários. Estes valores estão presentes até uma profundidade em torno de 1500 m. A assinatura geoeletrica da porção mais a leste do perfil revela um espessamento do pacote sedimentar com predominância resistiva em torno de 10 ohm.m.

Identifica-se a sudeste do perfil a cerca de 5 km, e nordeste a aproximadamente 30 km de profundidade, a presença de blocos condutores, com resistividades entre 20 e 60 ohm.m. O condutor crustal é observado, com o MT, em varias partes do mundo inclusive no sudeste do Brasil. As causas ainda não são bem certas. Estas são atribuídas presenças de fluidos salinos, a camadas condutivas de grafite, minerais condutores e fusão parcial, desidratação de minerais hidratados e difusão contendo voláteis dos magmas máficos. Outra explicação para presença de condutores crustais em regiões tectonicamente estáveis seria o encontro de placas arqueas ocorridos em orógenos proterozoicos, os quais permitiram a presença de sedimentos marinhos no interior da crosta. De modo geral, os condutores apresentam as mais variadas condutâncias e profundidades de seu topo. Trabalhos anteriores indicam que para a região sudeste do Brasil, o topo do condutor crustal esteja em uma profundidade de aproximadamente 10 km (FIGUEIREDO, 1997). Entretanto, neste trabalho foi observado que na região a oeste do perfil, porção que se encontram rochas cristalinos do complexo Paraíba

do Sul e complexo Juiz de Fora, o topo deste condutor aparece a uma profundidade de aproximadamente 30 km, já na porção leste do perfil onde se encontram depositados os sedimentos de borda da bacia do Espírito Santo, este condutor soergue atingindo uma profundidade mínima de 5 km.

Também corrobora a existência deste bloco condutivo nesta área, os movimentos tectônicos ocorridos no SE do Brasil durante o período Mesozóico/Cenozóico, que gerou um sistema de falhas. Este evento é relacionado ao cinturão de dobramentos da faixa Ribeira, que é mais flexível e compressível que as unidades que as unidades litológicas circunvizinhas. Estudos revelam que a maior parte da Faixa Araçuaí é composta de rochas remobilizadas no Arqueano do craton do São Francisco. Como a faixa Ribeira também é composta por crosta pós-arqueana remobilizada, conclui-se que o limite entre estas duas faixas pode ser uma sutura, a qual marca um importante limite crustal e aponta esse condutor em diferentes profundidades na área do sudeste brasileiro.

Foi utilizado como dado de comparação na identificação das feições estruturais da região um dado aeromagnetométrico (intensidade magnética total) disponibilizado pela CPRM. O objetivo era somar os dois dados exatamente no mesmo perfil e comparar os dados regionais do levantamento com os dados locais obtidos com o magnetômetro.

As modelagens e inversões das sondagens MT resultaram em um modelo geoeétrico de 50 km de profundidade. O modelo geoeétrico 2D de superfície apresentou uma boa correlação com a geologia de superfície, ou seja, as principais feições no modelo geoeétrico estão associadas às unidades geológicas e as principais falhas que ocorrem na região apresentam seus limites em profundidade (Figura 29).

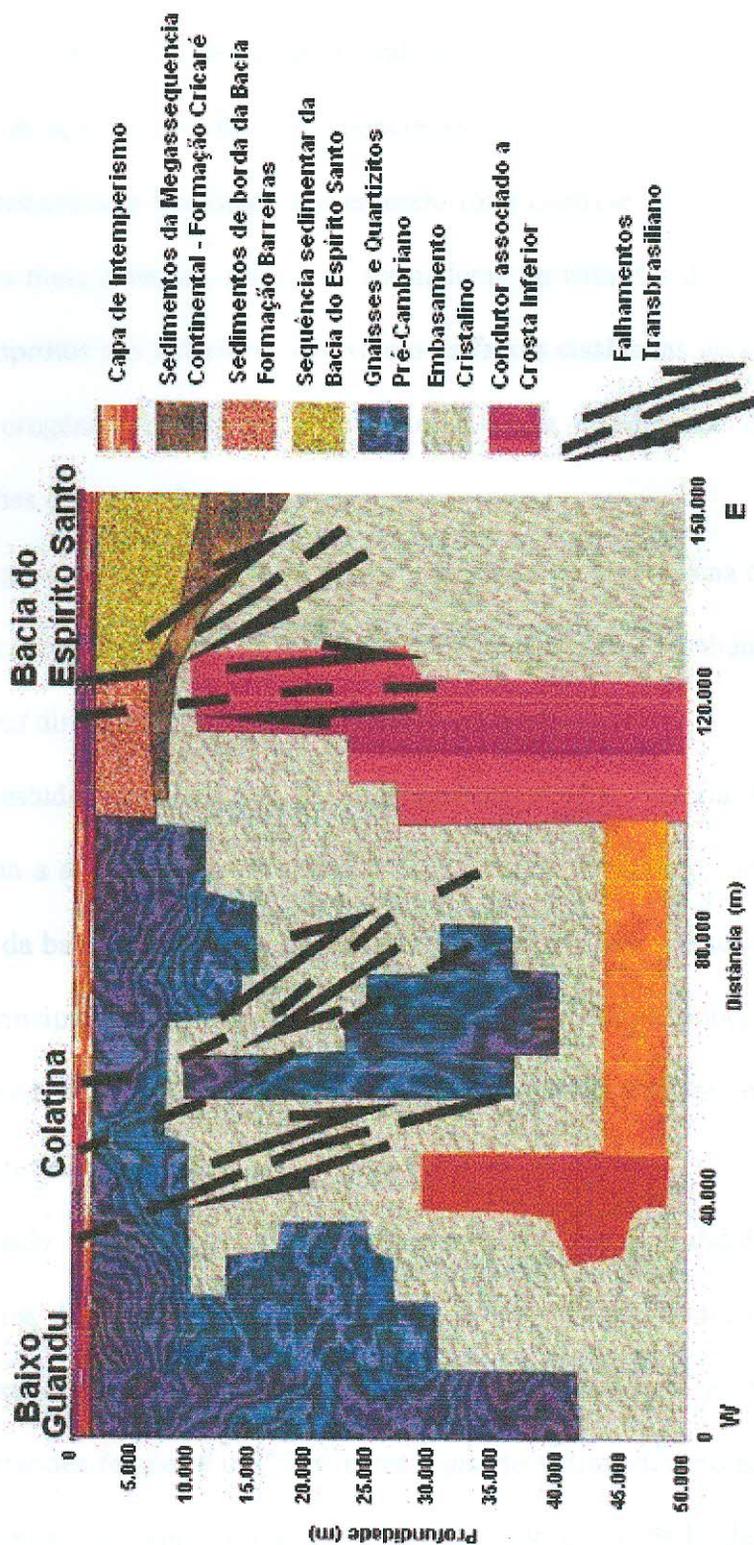


Figura 29 – Modelo geológico de subsuperfície da porção terrestre da bacia do Espírito Santo, baseado no modelo geolétrico 2D. (FONTE: COSTA, 2005).

Sob o ponto de vista tectonoestrutural a área estudada é controlada por alinhamentos de direção N20-30E correspondentes a estrutura gerada nos ciclos orogênicos transamazônico e brasileiro e exerceram forte controle sobre as orientações das falhas normais mais extensas, principais formadoras do rifte. Os dados de direção N10-25W superimpostos aos anteriores equivalem às faixas cisalhadas geradas no final do grande ciclo orogênico brasileiro, e integram a Faixa Cataclada de Colatina, relacionadas a falhas de empurrão.

O modelo geoeletrico apresentou a assinatura dessa importante zona de cataclase, expressa por uma faixa de resistividade inferior ao embasamento. Também é possível identificar um *trend* direcional no mapa de anomalias magnéticas.

Segundo estudos recentes, os falhamentos/lineamentos Vitória Colatina se estendem de forma a assumirem o controle de reservatórios turbidíticos de campos de petróleo do norte da bacia de Campos, como o campo de Roncador. Esses falhamentos seriam um dos principais carregadores de petróleo da região. Daí a importância de se conhecer o comportamento dessas estruturas em maiores profundidades como a que o método MT pode revelar.

A capacidade de investigação em pequenas e grandes profundidades sem a utilização de fontes de energia artificiais, não causando nenhum impacto ambiental, constitui uma grande vantagem do MT. O MT é muito interessante e válido para o mapeamento de grandes feições e interface entre o pacote sedimentar e o embasamento cristalino. Em campanhas exploratórias deve ser utilizado como dado de informação regional sendo complementar aos dados sísmicos.

CONCLUSÃO

Não há uma regra definida que explique o instante para a aplicação do método magnetotelúrico. Este deve ser utilizado tanto nos estágios primários de reconhecimento quanto em qualquer outro momento que seja necessário retirar alguma dúvida a respeito da geologia de uma bacia, reduzindo assim o risco exploratório.

No caso da Bacia do Espírito Santo, devido à possibilidade das vulcânicas de Abrolhos se encontrarem lado a lado com as muralhas de sal, ocorre muitas limitações sísmicas. Um prospecto indicado pelos intérpretes baseados na sísmica pode conter um reservatório com água salgada ou hidrocarbonetos. Mas um levantamento eletromagnético pode confirmar a presença ou não deste.

O futuro dos métodos eletromagnéticos é bastante promissor, pois, além do baixo impacto ambiental devido às transmissões de curta duração (caso seja com fonte controlada), ou as fontes naturais (magnetotelúrico) é possível o mapeamento e monitoramento de campos de petróleo de forma menos custosa do que a sísmica 4D.

As modelagens e inversões das sondagens MT descritas no estudo de caso resultaram em um modelo geoeletrico de 50 km de profundidade. O modelo geoeletrico 2D de superfície apresentou uma boa correlação com a geologia de superfície, ou seja, as principais feições no modelo geoeletrico estão associadas às unidades geológicas e as principais falhas que ocorrem na região apresentam seus limites em profundidade.

Os falhamentos/lineamentos Vitória-Colatina se estendem de forma a assumirem o controle de reservatórios turbidíticos de campos de petróleo do norte da bacia de Campos. Esses falhamentos seriam um dos principais carregadores de petróleo da região. Daí a importância de se conhecer o comportamento dessas estruturas em maiores profundidades como a que o método MT pode revelar.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

www.brasil-rounds.gov.br/geral/vartas/ce_espíritosanto.pdf

ALMEIDA, F. F. M., CARNEIRO, C. D. R., MIZUSAKI, A. M. P. (1996) Correlação do magmatismo das bacias da margem continental brasileira com o das áreas emersas adjacentes. *Revista Brasileira de Geociências*, 26(3): 125-138.

ASMUS, H.E., GOMES, J.B., PEREIRA, A.C.B., (1971) Integração geológica regional da bacia do Espírito Santo. In.: Congresso Brasileiro de Geologia, 25. São Paulo, SBG. Anais, V.3, p. 235 – 252.

BIASSUSI, A. S. (1990) *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro, 4(1):13-19.

BIZZI, L. A., SCHOBENHAUS, C., VIDOTTI, R. M., GONÇALVES, J. H., (2003). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Texto, Mapas e SIG. CPRM.*

BIASSUSI, A. S. (1996) *Análise Estratigráfica do Terciário Inferior da Bacia do Espírito Santo. Tese de Mestrado. UFRGS.*

CHANG, H.K., KOWSMANN, R.O., FIGUEIREDO, A.M.F., BENDER, A., (1992). *Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift System: an overview. Tectonophysics.*

COSTA, F. A (2005) *Investigações eletromagnéticas na porção continental da bacia do Espírito Santo e suas adjacências cristalinas. Dissertação de Mestrado. Observatório Nacional.*

COSMO, C. A., JUNIOR, A. P., RANGEL, H.D., WOLF, B., FIGUEIREDO, A. M. F., (1991). *Lagoa Parda Field – Brazil Espírito Santo Basin, Southeaster Brazil. AAPG Special Volumes. P. 349-360. Volume TR: Stratigraphic Traps II.*

DEIRÓ, N. F. R. (2006) *Investigação eletromagnética do substrato marinho: pré-etapa de um novo sistema na exploração de hidrocarbonetos. Trabalho de Graduação em Geofísica. Universidade Federal da Bahia.*

FREITAS, J. C. B. (2004). *Modelagem eletromagnéticas de meios heterogêneos com base na teoria do raio: implicações para o método do radar de investigação do subsolo (GPR). Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia.*

GAMBLE, T.D., GOUBAU, W.M., CLARKE, J. (1979) *Magnetotellurics with a remote magnetic reference. Geophysics, Vol. 44, NO I, P. 53-68.*

GUERRA, M.C. D. 1989. *A Estruturação da Bacia do Espírito Santo por Halocinese e Influência do Vulcanismo de Abrolhos. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.*

JONES, A.G. (1988) *Static shift of Magnetotelluric data and its removal in a basin sedimentary environment. Geophysics. Vol. 53, No 7, P 967 – 978.*

- KEY, K. W. (2003) Application of Broadband Marine Magnetotelluric Exploration to a 3D Salt Structure and a Fast-Spreading Ridge. PHD Thesis. University of California, San Diego.
- KLEMMER, H. D. (1980) Petroleum basins - classification and characteristics. *Journal of Petroleum Geology*, 3 (2): 187-207.
- LEWIS, L. L. (2005) A marine magnetotelluric study of the San Diego trough, Pacific Ocean, USA. Master of Science in Geological Sciences. San Diego State University.
- LINDSETH, R.O. & BERALDO, V.L. (1985) A late Cretaceous submarine canyon in Brazil: in Berg O.R. and D.G. Wolverton (eds.), *Seismic Stratigraphy II: An Integrated Approach to Hydrocarbon Exploration*, AAPG Memoir 39, p. 169-182.
- LIMA, V. Q. & BERALDO, AURICH, N., (1992) Cação Field – Brazil Espírito Santo Basin, Southeast Brazil. AAPG Special Volumes. P. 301-312. Volume TR: Stratigraphic Traps III.
- MILANI, E. J., BRANDÃO, J. A. S. L., ZALÁN, P. V. e GAMBOA, L. A. P. (2000) Petróleo na Margem Continental Brasileira: Geologia, Exploração, Resultados e Perspectivas. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 18(3).
- MOHRIAK, W.U. Bacias Sedimentares da Margem Continental Brasileira. In: BIZZI, L. A., SCHOBENHAUS, C., VIDOTTI, R. M., GONÇALVES, J. H., (2003). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Texto, Mapas e SIG. CPRM, Capítulo III.*
- PEREIRA, J.P., (1992) Considerações sobre a estratigrafia do Cenomaniano-Santoniano em algumas bacias marginais brasileiras e sua implicação na história tectônica e sedimentar da margem continental. *Boletim de Geociências da Petrobrás*.
- PORSANI, J. L. & FONTES, S. L. (2001) O método magnetotelúrico aplicado à bacia do São Francisco, Minas Gerais. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 19(2).
- RAJA GABAGLIA, G. P. & FIGUEIREDO, A. M. F. de (1991) Evolução dos conceitos acerca das classificações de bacias sedimentares. In: Raja Gabaglia, G. P. & Milani, E. J. (eds.), *Origem e evolução das bacias sedimentares*. Petrobras, Rio de Janeiro, pp. 31-45.
- SAMPAIO, E. E. S. (2004) Campo eletromagnético devido a uma linha de dipolos elétricos em um meio condutor, EDUFBA, Salvador-Bahia.
- SOBREIRA, J. F. F. & FRANÇA, R. L. (2006). Um modelo tectono-magmático para a região do Complexo Vulcânico de Abrolhos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 143-147, nov. 2005/maio 2006.
- SOUZA-LIMA, W. & JUNIOR, G. P. H. (2003). Bacias sedimentares brasileiras: origem, evolução e classificação. *Fundação paleontológica Phoenix*. Ano 5, N.49.
- SZATMARI, P. & PORTO, R. (1986) Classificação tectônica das bacias sedimentares terrestres do Brasil. In: Figueiredo, A. M. F. de & Raja Gabaglia, G. P., *Sistema classificatório aplicado às bacias sedimentares brasileiras*. *Revista Brasileira de Geociências*, 16 (4), p. 357.

THOMAZ FILHO, A., MIZUSAKI, A. M. P., MILANI, E. J., CESERO, P., (2000) Rifting and magmatism associated with the South America and Africa break up. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(1):017-019, março de 2000.

TOURNEIRE, B., CHOUTEAU, M., MARCOTTE, D. (2004) Estimation and removal of MT static shift using geostatistical methods. *Proceedings of the 17th Workshop. IAGA WG 1.2 on Electromagnetic induction in the earth. Hyderabad, Índia.*

TRAVASSOS, J. M. & MENEZES, P. T. L. (1999) Geoelectrics structure beneath limestones of the São Francisco Basin, Brazil. *Earth Planets Space*. 51, P 1047-1058

VIEIRA, R.A.B., MENDES, M.P., VIEIRA, P.E., COSTA, L.A.R., TAGLIARI, C.V., BARCELAR, L.A.P., FEIJÓ, F.J., (1994) Bacias do Espírito Santo e Mucuri. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, Rio de Janeiro, 8 (1): 191 – 202.

VOZOFF, K. (1972) The Magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins. *Geophysics*. Vol. 37, No 1, P 98-141

WARD, S. H. & HOHMANN, G. W. (1987) *Electromagnetic Theory for Geophysical Applications: in Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Ch.4, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.*