



UFRJ

Julio Garcia Carvalho

APLICAÇÃO DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO EM BACIAS
SUBANDINAS NA BOLÍVIA E NO PERU

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:

Leonardo Borghi
Paulo de Tarso Luiz Menezes

Rio de Janeiro
Agosto de 2007

MGL
C331A

| | |
|--|------|
| WFRJ | |
| Centro de Ciências e Matemática • de Botafogo | |
| Biblioteca Central | |
| Nº de Registro | —:UU |
| 6072/10 05/01/10 | |
| ORIGEM Doações / UFRJ Dep. de Geologia | |

inv. 2011

CARVALHO, Julio Garcia

Aplicação do Método Magnetotélúrico em Bacias Subandinas na Bolívia e no Peru/ Julio Garcia Carvalho -- Rio de Janeiro: UFRJ/ IGeo, 2007.

VI, 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: Leonardo Borghi, Paulo de Tarso Luiz Menezes

1 Geofísica. 2 Geologia de Engenharia e Ambiental - Trabalho de Conclusão de Curso. I Leonardo Borghi. li. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. Ili. Aplicação do Método Magnetotélúrico em Bacias Subandinas na Bolívia e no Peru.

Julio Garcia Carvalho

APLICAÇÃO DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO EM
BACIAS SUBANDINAS NA BOLÍVIA E NO PERU

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:

Leonardo Borghi

Paulo de Tarso Luiz Menezes

Aprovada em: 01.08.2007

Por:

Leonardo Borghi (UFRJ)

Paulo de Tarso Luiz Menezes (PETROBRÁS)

UFRJ
Rio de Janeiro
2007

Agradecimentos

Agradeço ao meu pai Renê e à minha mãe Iná pelo apoio sem medidas, e à minha irmã Elisa pela eterna amizade.

Agradeço à PETROBRÁS pelo apoio e investimento neste período de formação e à UFRJ pelo endosso acadêmico.

Agradeço a todos que tiveram participação na elaboração deste texto: aos professores Leonardo Borghi (UFRJ) e Paulo de Tarso Luiz Menezes (PETROBRÁS) pela orientação; aos colegas de grupo, Adriana Lucia Cerri Triques, Bruno Fidalgo Telles Rodrigues, Gustavo Catão Alves e Fabiano Cardoso Pereira pelo compartilhamento do estudo da Bacia Madre de Dios; ao Físico Adriano José Aguiar Marçal e ao Geólogo Ivo Trosdtorf Junior por muitos esclarecimentos; aos colegas Cesar Kazzuo Vieira e Luiz Eiki Ikezawa por disponibilizarem o artigo do estudo de caso; aos colegas Analena Miléo Câmara de Oliveira, Cesar Kazzuo Vieira e Tiago Manes Nunes pelas discussões referentes ao método magnetotelúrico.

Agradeço aos coordenadores do Curso de Formação de Geofísicos, Álvaro Lúcio de Oliveira Gomes e Marilea Nascimento e aos funcionários das bibliotecas da UFRJ e da PETROBRAS.

Resumo

CARVALHO, Julio. **Aplicação do Método Magnetotelúrico em Bacias Subandinas na Bolívia e no Peru.** 2007. VI, 79 p. 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.

Neste trabalho será apresentada a aplicação do método magnetotelúrico para caracterização estrutural de bacias Subandinas. A primeira parte contém um estudo sobre todos os aspectos geológicos da Bacia Madre de Dios situada na Bolívia e no Peru. A segunda parte contém uma descrição dos fundamentos do método eletromagnético magnetotelúrico. Na terceira parte será apresentado um estudo de caso baseado em um trabalho anterior, referente à aplicação do método magnetotelúrico na Bacia de Cinturões de Cavalgamento do Sul da Bolívia, assim como uma breve descrição da geologia dessa bacia. Uma aplicação semelhante na Bacia Madre de Dios será sugerida.

Palavras-chave: método magnetotelúrico; Bacia Subandina Madre de Dios, Bacia Subandina de Cinturões de Cavalgamento.

Abstract

CARVALHO, Julio. **Aplicação do Método Magnetotelúrico em Bacias Subandinas na Bolívia e no Peru. [Application of the Magnetotelluric Method on Sub-Andean basins in Bolívia and Peru].** 2007. VI, 79 p. 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.

In this work the application of the magnetotelluric method will be presented in the context of the structural characterization of Sub-Andean basins. At first part the Madre de Dios Basin situated in Bolivia and Peru is studied over all its geological aspects. At the second part a description of the magnetotelluric method fundamentals is presented. At the third part it will be presented a case study based on a previous work, about the application of the magnetotelluric method on the Thrust Belt Basin of Southern Bolivia, as well as a short geological description of this basin. A similar application on Madre de Dios basin will be suggested.

Key-Words: magnetotelluric method; Madre de Dios sub-Andean basin; Sub-Andean Thrust Belt of Southern Bolivia.

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Mapas de localização da Bacia Madre de Dios | 4 |
| Figura 2 - Elementos morfoestruturais do continente Sul-americano .. | 19 |
| Figura 3 - Elementos estruturais referentes à Bacia Madre de Dios com suas principais estruturas | 19 |
| Figura 4 - O Arco de Fitzcarrald | 20 |
| Figura 5 - Mapa da região que compreende a bacia Madre de Dios e arredores | 24 |
| Figura 6 - Mapa da região da bacia Madre de Dios com dados de maturação térmica | 25 |
| Figura 7 - Oscilações climáticas Pleistocênicas e implicações no nível marinho | 26 |
| Figura 8 - Sistema petrolífero da Formação Tomachi | 27 |
| Figura 9 - Gráfico de índice de hidrogênio versus índice de oxigênio..... | 28 |
| Figura 10- Arranjo de Campo para sondagem MT | 37 |
| Figura 11 - Bandas de frequência usadas para promediação | 43 |
| Figura 12 - Mapa geológico generalizado do cinturão Subandino Sul .. | 53 |
| Figura 13 - História Geológica da área Caipipendi | 56 |
| Figura 14 - Seção geológica transversal da estrutura Itau | 58 |
| Figura 15 - Localização de Itau X1 | 59 |
| Figura 16 - Inversão 2D suave da linha Itau M03 | 60 |
| Figura 17 - Seção final da inversão 3D ao longo da linha Itau M03 .. | 61 |

Lista de Quadros

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Quadro com as bacias sedimentares do Peru | 7 |
| Quadro 2 - Quadro de prospectas e leads da Bacia Madre de Dios no lado peruano | 9 |
| Quadro 3 - Estratigrafia generalizada da Bacia Madre de Dios na região boliviana | 11 |
| Quadro 4 - Estratigrafia generalizada da Bacia Madre de Dios na região Peruana | 12 |

Sumário

| | |
|---|------|
| Agradecimentos | v |
| Resumo..... | vi |
| <i>Abstract</i> | vii |
| Lista de Figuras | viii |
| Lista de Quadros | ix |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 OBJETIVO | 2 |
| 3 MÉTODO..... | 3 |
| 4 CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA | 4 |
| 4.1 Estratigrafia | 10 |
| 4.2 Geologia Estrutural | 16 |
| 4.3 Geologia Histórica | 22 |
| 4.4 Geologia do Petróleo | 27 |
| 5 MÉTODO MAGNETOTELÚRICO | 31 |
| 5.1 Métodos Eletromagnéticos..... | 31 |
| 5.2 Características Do Método Magnetotelúrico | 33 |
| 5.2.1 História | 33 |
| 5.2.2 Fontes de Campo | 34 |
| 5.2.3 Os Sinais | 35 |
| 5.2.4 Procedimento de Campo | 36 |
| 5.2.5 Efeitos da Condutividade da Terra Sobre os Campos | 38 |
| 5.2.6 Resistividade e Resistividade Aparente | 39 |
| 5.2.7 Tensor Impedância e o "Tipper" | 40 |
| 5.2.7.1 Tensor Impedância..... | 40 |
| 5.2.7.2 "Tipper" | 45 |
| 5.2.8 Curvas de Resistividade Aparente | 45 |
| 5.2.9 Sobre o Problema do Auto-estado Magnetotelúrico | 47 |
| 5.2.10 Inversão | 49 |
| 5.2.11 Inversão - MT 3D | 50 |

| | |
|---|----|
| 5.3 Estudo de Caso | 52 |
| 5.3.1 Descrição Geológica da Bacia | 52 |
| 5.3.1.1 Estratigrafia | 53 |
| 5.3.1.2 Avaliação Geoquímica..... | 54 |
| 5.3.1.3 Potencial de Hidrocarboneto | 55 |
| 5.3.2 Aplicação do Método Magnetotelúrico 3D | 56 |
| 5.3.2.1 Aquisição de Dados | 58 |
| 5.3.2.2 Interpretação de Dados | 59 |
| 5.3.2.3 Considerações Finais | 61 |
| 5.3.3 Possível aplicação do Método Magnetotelúrico 3D na Bacia Madre de Dios | 62 |
| 6 CONCLUSÕES | 65 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 66 |

1 INTRODUÇÃO

A bacia sedimentar Madre de Dios, localizada no continente sul-americano, fazendo parte tanto no Peru, Bolívia e Brasil, se estende por sua grande maioria na superfície amazônica, o que pode explicar que é uma região de difícil acesso, assim como apresenta precárias condições de vida e trabalho. Entretanto, milhares de pessoas trabalham na região, devido a um grande potencial mineral, com abundância de minerais pesados e altos teores de ouro nos sedimentos aluviais. Em relação ao petróleo, poucos estudos foram realizados na região, até os dias atuais. Pela dificuldade de acesso e por apresentar áreas de proteção ecológica, ou seja, um grande custo de mobilização para sua exploração, poucas empresas petrolíferas se arriscaram em descobrir campos de hidrocarbonetos na bacia. Mesmo assim, as poucas empresas que fizeram alguns trabalhos exploratórios na região, não fizeram descobertas economicamente viáveis para que continuassem os trabalhos na região. Por isso, a Bacia Madre de Dios apresenta poucos dados exploratórios referentes a hidrocarbonetos, e os poucos que existem, não indicam reservas de interesse econômico. Apesar disso, alguns autores acreditam que a bacia apresenta algum potencial petrolífero, devido a algumas evidências como o elevado potencial de geração de hidrocarbonetos, sendo até comparado com rochas geradoras da Arábia Saudita, e a presença de excelentes reservatórios de origem deltáica com indícios de hidrocarboneto. Porém, alguns dados parecem comprovar que a bacia não apresenta armadilhas suficientes e um bom sistema de falhas para que o hidrocarboneto seja armazenado. Portanto, a Bacia Madre de Dios precisa ser mais bem estudada e explorada para que haja maiores detalhes a respeito do seu potencial econômico petrolífero.

2 OBJETIVO

O objetivo original desta monografia consistiu na caracterização geológica da Bacia Subandina Madre de Dios situada na Bolívia e no Peru, no estudo de um método eletromagnético, especificamente o método magnetotelúrico, para análise da bacia e no estudo de um trabalho publicado referente à aplicação do método magnetotelúrico na Bacia Madre de Dios. Contudo, este último objetivo foi modificado para o estudo referente à aplicação do método magnetotelúrico na Bacia Subandina de Cinturões de Cavalcamento do Sul da Bolívia, uma vez que não se obtiveram artigos específicos sobre o assunto referentes à Bacia Madre de Dios.

3MÉTODO

Esta monografia envolveu em levantamento bibliográfico mais abrangente possível de artigos publicados e de páginas disponíveis na internet sobre a caracterização geológica da Bacia Madre de Dios. As principais publicações consultadas são o Memoir 62 da *American Association of Petroleum Geophysicists* AAPG, a Revista *Oil and Gas* e a *Revista Técnica de Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos*. Entretanto deve-se observar que a Bacia Madre de Dios não tem nenhum poço produtor de petróleo, de maneira que as informações disponíveis sobre ela são relativamente escassas.

A caracterização geológica da Bacia de Cinturões de Cavalgamento do Sul da Bolívia foi breve e concentrou-se no Memoir 62 da AAPG.

O estudo do método magnetotelúrico baseou-se em artigos publicados principalmente na revistas *Geophysics* e *Surveys in Geophysics* e na publicação *Investigations in Geophysics* da *Society of Exploration Geophysicists*.

4 CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA

A Bacia Madre de Dios está localizada no continente sul-americano, estendendo-se desde o sudeste peruano até o extremo norte da Bolívia e uma pequena parte do estado do Acre no Brasil (SORUCO. 2000), como pode ser visualizada na Figura 1a. Alguns autores não consideram que a bacia avance em território brasileiro (Figura 1b).



Figura 1-Mapas de localização da Bacia Madre de Dias. (a) IHS, 1995; (b) SCOTT, 2007.

Possui limite ao norte com a bacia de Ucayali pelo Arco de Fitzcarrald; a leste com o escudo brasileiro; a oeste com a zona subandina; e a sul pelo Arco de Madidi.

Estende-se por uma área de cerca de 120.000 km² segundo MATHALONE (1995), apesar de não haver unanimidade na literatura em relação ao tamanho da bacia, podendo encontrar-se a extensão de 95.000 km², como 170.000 km², de acordo com outros autores (GÓMEZ, 2000; PETERS, 1997a). Pelo lado boliviano, o acesso pode ser feito por via aérea ou através dos rios Madre de Dios, Abuná e Orton (GÓMEZ, 2000).

Trata-se de uma sub-bacia de antepaís (*foreland*) neógena, formada pela subdivisão de uma grande bacia intracratônica denominada bacia do Amazonas.

Trabalhos realizados pelas companhias YPFB, Occidental, Mobil e associadas, com fins petrolíferos, permitiram conhecer um pouco mais da sua geologia e interpretá-la como uma unidade geológica independente (SORUCO, 2000). Porém, até hoje, a Bacia Madre de Dios é muito pouco estudada e explorada, com escassez de dados exploratórios, como pode ser visto no Quadro 1.

As características litológicas juntamente com os processos geológicos, geomorfológicos e climáticos são as causas principais do relevo atual da bacia de Madre de Dios, o qual se caracteriza por apresentar grandes unidades fisiográficas: a faixa oriental da Cordilheira subandina e a planície de Madre de Dios. Estas unidades se diferenciam por suas características litológicas e pedogênicas, e pelo tipo de cobertura vegetal. Concordantes a este tipo de relevo, os principais processos morfodinâmicos que afetam a área são os deslizamentos e as inundações. Tais características fisiográficas condicionam também as diversas atividades sócio-econômicas.

Os sedimentos nesta bacia possuem idades variando desde o início do Paleozóico ao Quaternário. O registro sedimentar possui mais de 9.000 m de espessura. Podem ser encontrados de 200 a 300 m de folhelhos geradores na Bolívia, sendo que, ao sul do

Peru, a Formação Copacabana atinge 1.000 m de espessura (PETERS, 1997a; MORETTI, 1994).

Do ponto de vista de recursos minerais, a Bacia Madre de Dios tem um particular interesse econômico devido a importantes indícios de hidrocarbonetos, evidenciados mediante três perfurações exploratórias efetuadas nos rios Manuripi e Madre de Dios, de acordo com SORUCO (2000).

A geradora principal é do final do Devoniano, havendo também algum potencial gerador nas rochas do Permiano, Mississippiano e Cretáceo (PETERS, 1997a). A matéria orgânica é marinha, dos tipos I e II e as rochas geradoras estão entre as mais ricas do mundo (COT de até 16% em peso), mostrando bom potencial gerador (índice de hidrogênio de 600 kg HC/ton rocha/ COT) (PETERS, 1997a; PETERS 1997b). Há folhelhos maduros em praticamente toda a extensão da bacia. A capacidade estimada da geradora devoniana é de 250 a 1.000 bilhões de barris de óleo equivalente (PETERS, 1997b).

Entretanto, segundo PETERS (1997a), as rochas reservatório do Ordoviciano e Siluriano talvez estejam isoladas das geradoras devonianas, pois são poucos os falhamentos presentes na bacia (SORUCO, 2000), e é possível que não haja armadilhas estratigráficas, ao menos na porção boliviana da bacia (PETERS, 1997b; SORUCO, 2000).

O Quadro 2 traz dados de prospectas e *leads* da bacia, assim como de reservas estimadas pela empresa norte-americana Mobil, disponibilizados na página da companhia petrolífera do Peru, Perupetro (EGÚSQUIZA, 2004).

Quadro 1 - *Bacias sedimentares do Peru e a relação de seus dados exploratórios para hidrocarboneto (modificado de (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2001)), MM acres = Milhões de acres; BPC = Bilhões de US cúbicos; MMbbl = Milhões de barris; BPD = Barris por dia; MPCD = Milhares de pés cúbicos /Or dia.*

| BACIAS SEDIMENTARES DO PERÚ – INFORMAÇÕES GERAIS | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------|--------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|--|------------------------|------------|-----------|--|
| Bacia | Área (milhões acres) | Poços Perfur | Espessura Sediment. (pés) | Potencial da Bacia (MMbbl) | Reservas Provadas em 31/12/99 | | | Produção Acumulada de petróleo (MMbbl) | Produção média em 2000 | | | Informações Disponíveis |
| | | | | | Óleo (MMbbl) | Gás (BPC) | GNL (MMbbl) | | Óleo (bpd) | Gás (MPCD) | GNL (bpd) | |
| Tumbes - Progreso | 1,8 | 496 | 19000 | 293 | | | | 4 | | | | Geologia de superfície, magnetometria, gravimetria, sísmica mar. e terr., dados de poços e de produção, estudos amb. |
| Talara | 4,2 | 13409 | 26000 | 1873 | 182 | 296 | | 1389 | 32823 | 88709 | 651 | Informação geofísica e geológica, dados de poços e de produção, estudos ambientais. |
| Trujillo | 4,3 | 1 | 11500 | 424 | | | | | | | | Sísmica marítima e dados de um poço. |
| Lima | 6,1 | | 6500 | 340 | | | | | | | | Sísmica marítima. |
| Mollendo | 6,4 | | 12500 | 686 | | | | | | | | Sísmica marítima. |
| Lancones | 1 | | 10000 | 85 | | | | | | | | Geologia de superfície, gravimetria e estudos geofísicos. |
| Sechura | 7,4 | 60 | 11500 | 629 | | | | | | | | Gravimetria, magnetometria, dados geológicos, dados de poços, sísmica e estudos ambientais. |
| Salaverry | 7,9 | 3 | 13000 | 880 | | | | 1 | 1 | 1 | | Sísmica marítima, dados de poços e estudos amb. |
| Pisco | 8,2 | 1 | 15000 | 633 | | | | | | | | Geologia de superfície, aeromagnetometria, sísmica, geoquímica e dados de um poço. |
| Moquegua | 4 | | 1000 | 36 | 1 | 1 | | 1 | | | | Dados geológicos de entidades aovernamentais. |

| | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------------|------------|--------------|-------------|------------|------|-----|------------|--------------|--------------|------|---|
| Santiago | 4 | 7 | 32000 | 687 | | | | | | | | Geologia de superfície, gravimetria, fotos aéreas, SLAR, imagens de satélites, geoquímica, dados de poços e estudos ambientais. |
| Bagua | 1,3 | | 23000 | 160 | | | | | | | | Geologia de superfície e aeoaquímica. |
| Huallaga | 7,4 | 1 | 26000 | 1383 | | | | | | | | Geologia de superfície, gravimetria, sísmica, geoquímica, imagens de radar, dado de um poço e estudos ambientais. |
| Ene | 2,5 | | 13000 | 934 | | | | | | | | Geologia de superfície, aeromagnetometria, SLAR, fotos aéreas, e aeoaquímica. |
| Titicaca | 10 | 33 | 25000 | 1797 | | | | | | | | Geologia de superfície, aeromagnetometria, sísmica, geoquímica, dados de poços, estudos amb. |
| Maraffon | 49,4 | 406 | 21000 | 5565 | 126 | | | 827 | 62006 | 12434 | | Aeromagnetometria, gravimetria, sísmica, SLAR, fotos aéreas, geoquímica, dados de poços e de produção, estudos amb. |
| Ucayali | 25,9 | 137 | 19000 | 10612 | 1 | 8398 | 581 | 25 (1) | 504 | 59076 | 3885 | Aeromagnetometria, gravimetria, sísmica, fotos aéreas, geoquímica, dados de poços e de produção, estudos amb. |
| Madre de Dios | 22,2 | 6 | 33000 | 6266 | | | | | | | | Geologia de superfície, gravimetria, geoquímica, sísmica, paleontologia, fotogeologia, SLAR, fotos aéreas, dados de poços e estudos ambientais. |

Quadro 2 - Quadro de prospectos e leads da Bacia Madre de Dios no lado peruano (EGÚSQUIZA, 2004).

| PROSPECTS AND LEADS | | 7 = 29 KM 2 | | Petroleum System | | | Spec. TD m | Por | MOBIL Spec. Reserves MMBOE |
|---------------------|----------------------------------|---|-------------------------|------------------------------------|------------------------|--|------------|------|----------------------------|
| Name | Description & Status | Existing Control | Source Rocks | Seal | Reservoir | | | | |
| 1 | CANDAMO SOUTH PROSPECT (PORTION) | Triangle Zone. Anticline 4-way closure. Fault dependent closure. Better strct/struct (updip) thln well Oil & gas Favorable. | 4 dip lines | Ene, Copacabana, Ambo & cabanillas | Tertiary, Chonta & Ene | Cretaceous and Permian. | 3,300 | G | |
| 2 | CARISA LEAD | Frontal Thrust. Anticline 3-way closure. Fault dependent closure. Oil & gas Favorable. | Landsat | Copacabana, Cabanillas | Tertiary, Chonta | Cretaceous. | 4,000 | VG | |
| 3 | COLORADO LEAD | Frontal Thrust. Anticline 3-way closure. Unknown strike closure. Oil & gas Favorable. | 1 di line & u'ndsat | Ene, Copacabana, Ambo & cabanillas | Tertiary, Chonta & Ene | Cretaceous. Permian Present? | 4,000 | VG | |
| 4 | N LEAD | Triangle Zone. Anticline 3-way closure. Oil & gas Favorable. | 1 dip line | Ene, Copacabana, Ambo & cabanillas | Tertiary, Chonta & Ene | Cretaceous and Permian. | 3,500 | VG | 1,900 |
| 5 | DALUENE SOUTH LEAD | Triangle Zone Anticline 3-way closure Fault dependent. Unknown strike closure. Oil & gas Favorable | 1 dip line | Ene, Copacabana, Ambo & Cabanillas | Tertiary, Chonta & Ene | Cretaceous and Permian. | 3,500 | G | 1,785 |
| 6 | ESPIRENI EAST LEAD | Triangle Zone. Anticline 3-4 way closure. Unknown strike closure. Oil & gas Favorable. | 1 dip line | Ene, Copacabana, Ambo & Cabanillas | Tertiary, Chonta & Ene | Cretaceous and Permian. | 3,800 | G | 530 |
| 7 | ESPIRENI WEST LEAD | Triangle Zone. Anticline 3-4 way closure. Unknown strike closure. Oil & gas Favorable. | 1 dip line | Ene, Copacabana, Ambo & Cabanillas | Tertiary, Chonta & Ene | Cretaceous and Permian. | 3,800 | G | 860 |
| 8 | KARENE LEAD | Frontal Thrust. Anticline 4-way closure. Unknown strike closure. Oil & gas Favorable. | 1 dip line | Ene, Copacabana, Ambo & Cabanillas | Tertiary, Chonta & Ene | Cretaceous. Permian Present? | 4,000 | VG | 200 |
| 9 | MIRAOOR LEAD | Triangle Zone. Anticline 4-way closure. Oil & gas Favorable. | 1 dip line | Ene, Copacabana, Ambo & Cabanillas | Tertiary, Chonta & Ene | Cretaceous. Permian Present? | 4,000 | VG | 200 |
| 10 | NEUASDINISCATO | Hint rhand Thrust. Anticline 3-way closure. Fault dependent. No seismic. Gas & Cond Favorable. | Landsat | Ene, Copacabana, Ambo & cabanillas | Tertiary, Chonta & Ene | Cretaceous and Permian. | 3,200 | G | 1,360 |
| 11 | HERNANDEZ COLLA | Frontal Thrust. Anticline 4-way closure. Leaking oil/gas. | Landsat | Ene, Copacabana, Ambo & Cabanillas | Tertiary, Chonta & Ene | Cretaceous and Permian. Tarma (Green SS) may bein core | 3,000 | G | 220 |
| 12 | PINI PINI LEAD | Hint rhand Thrust. Anticline 3-4 way closure. Unknown strike closure. Gas & Cond Favorable | Landsat & seismic | Ene Copacabana, Ambo & Cabanillas | Tertiary, Chonta & Ene | Cretaceous and Permian. | 3,500 | G | 1,255 |
| 13 | PUQUIRI NORTH LEAD | Triangle Zone. Anticline 3-way closure. Fault dependent. Unknown strike closure. Oil & gas Favorable. | 1 dip line | Ene, Copacabana, Ambo & Cabanillas | Tertiary, Chonta & Ene | Cretaceous and Permian. | 3,500 | VG/G | 715 |
| 14 | PUQUIRI SOUTH LEAD | Triangle Zone. Anticline 3-way closure. Fault dependent. Unknown strike closure. Oil & gas Favorable. | 1 dip line | Ene, Copacabana, Ambo & cabanillas | Tertiary, Chonta & Ene | Cretaceous and Permian. | 3,700 | G | 395 |
| 15 | SAN GABAN LEAD | Triangle Zone. Anticline 3-4 way closure. Fault dependent. Unknown strike closure & fault seal. Oil & gas Mod Favorable. | 1 dip line | Ene, Copacabana, Ambo & cabanillas | Tertiary, Chonta & Ene | Cretaceous. Permian Present? | 3,500 | G | 905 |
| 16 | UPPER MAYO (PORTION) | Triangle Zone. Anticline 4-way closure. Fault dependent closure. Oil & gas Favorable. | 1 dip and 1 strike line | Ene, Copacabana, Ambo & cabanillas | Tertiary, Chonta & Ene | Cretaceous. Permian Present? | 3,500 | G | 900 |
| TOTAL | | | | | | | 11,025 | | |

4.1 ESTRATIGRAFIA

Devido às grandes variações laterais de fácies na Bacia Madre de Dios, foi introduzido um grande número de nomes de unidades litoestratigráficas na literatura.

Os sedimentos mais antigos não afloram na área, sendo que sua presença é conhecida pela perfuração dos poços Pando X-1 e Manuripi X-1, com profundidades finais de 1.968 e 1.542 m, respectivamente, segundo ISAACSON *et al.* (1995 *apud* SORUCO, 2000). Estes dois poços foram perfurados em 1991 pelas empresas Mobil Boliviana de Petróleos Inc. (50%) e Occidental Boliviana Inc. (50%) entre os rios Manuripi e Madre de Dios. Segundo SORUCO (2000), com as informações disponíveis dessas companhias e informações de laboratório do centro de tecnologia petroleira da YPFB, é possível estabelecer as relações estratigráficas (Quadro 3) para a região boliviana. Já a parte peruana da bacia apresenta uma coluna estratigráfica com diferentes nomenclaturas, conforme mostrado no Quadro 4. Porém, como não foi encontrada ampla bibliografia nesta região, neste trabalho nos ateremos à descrição do lado boliviano.

Embasamento

Não são disponíveis grandes informações a respeito da natureza das rochas do embasamento cristalino da bacia. A única referência disponível na Bolívia refere-se ao poço Pando X-1 que alcança um embasamento metamórfico constituído por gnaisse granatífero milonitizado, segundo SOLIS & SANDERS (1991 *apud* SORUCO, 2000), ou quartzitos miloníticos granatíferos, de acordo com ISAACSON *et al.* (1995 *apud* SORUCO, 2000). Este embasamento foi encontrado a uma profundidade de 1.981 m, na

qual estas rochas corresponderiam à continuação até o oeste do Cráton de Guaporé na Bolívia.

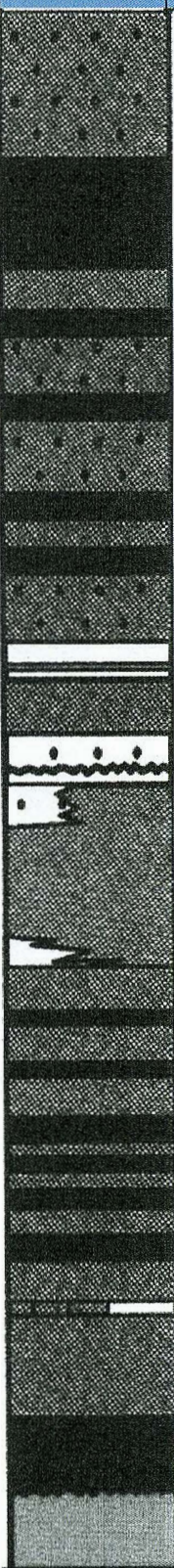
Ordoviciano

Como ambos os poços acima mencionados não chegam às profundidades referentes às formações Enadere e Tarene do Ordoviciano, não existe uma informação precisa e completa destas unidades. Segundo a informação sísmica, estas unidades estariam presentes na Bacia Madre de Dios, porém até o presente não houve nenhum poço exploratório no setor boliviano que as alcançou. No Peru, esta área possui apenas uma informação documentada no poço Los Amigos-2.

Quadro 3 - *Estratigrafia generalizada da bacia Madre de Dios na região boliviana (modificado de (Soruco, 2000)).*

| Ciclo | Sistema | Formação | Evento Tectônico |
|--------------|---|--|----------------------|
| Andino | Quaternário | Candelária | Bacia de Antepaís |
| | Neógeno | Cobija Tutumó Charqui Quendeque | |
| | Paleogeno - Neógeno | Bala | |
| | Cretáceo | Flora Eslabón Beu | |
| Subandino | Permo-Carbonífero | Copacabana Yaurichambi | Bacia Intracratônica |
| Cordillerano | Carbonífero Inferior Devoniano Siluriano superior | Toregua Tomachi Tequeje | |
| | Siluriano? | S/I | |
| Tacsariano | Ordoviciano | Tarene ? Enadere ? | |
| Brasiliano | ? | Embasamento | |

Quadro 4-Estratigrafia generalizada da Bacia Madre de Dios na região Peruana, modificada de PETERS (1997a).

| | | Grupo/Formação | Escala (m) | Litologia | Eventos Tectônicos |
|---------------|----------------------------------|---------------------------------|------------|---|--------------------|
| Quaternário | | | | | |
| Terciário | Ipururo | Red Beds Superiores 0-1000 m | 9000 |  | Bacia de Antepaís |
| | | Arentios 500-1000, | 8000 | | |
| | Huayabamba | Red Beds Inferiores | 7000 | | |
| 6000 | | | | | |
| Cretáceo | Vivien | | 5000 | Bacia Intracratônica | |
| | Chonta | | | | |
| | Oriente | | | | |
| Permiano | MBu | | 4000 | | |
| | Ene | | | | |
| | Copacabana | | | | |
| Carbonífero | Tarma | | 3000 | | |
| | Ambo 300-1200 m | | | | |
| Devoniano | Cabanillas/Tomachi 300-1000 m | | 2000 | | |
| Siluriano | Ananea | San Gaban | 1000 | | |
| Ordoviciano | Carabaya | | | | |
| Pré-Cambriano | Embasamento | | 0 | | |

Seqüência Siluriano - Carbonífero inferior

Baseando-se em registros sísmicos realizados pelas companhias petroleiras que trabalharam na Bolívia e no Peru, assim como nos resultados dos poços exploratórios Pando X-1 e Manuripi X-1, foi possível estabelecer que as formações referentes a este ciclo, Tequeje, Tomachi e Toregua, estão presentes na bacia. Dados paleontológicos de MORETTI *et ai.* (1994 *apud* SORUCO, 2000), indicam que os primeiros metros da base da Formação Tequeje (a 1.935 m de profundidade), no poço exploratório de Pando-X1, estariam presentes palinomorfos do final do Siluriano. É ainda uma questão em aberto se o Siluriano está mais bem desenvolvido em algum outro setor da bacia e se a Formação Tequeje se inicia durante o Siluriano Superior ou se os vestígios destes palinomorfos provêm de sedimentos remodelados. De qualquer forma, a informação estabelece que a bacia tivesse sido encoberta por águas no Siluriano.

Sobre as rochas do embasamento, foram depositados aproximadamente 220 m de sedimentos fluviais da Formação Tequeje, que se inicia com arenitos transgressivos e um conglomerado delgado basal, seguido de uma seqüência pelítica. Estas rochas foram depositadas em um sistema de relevo de canais de acordo com ISAACSON *et al.* (1995 *apud* SORUCO, 2000). Esta formação é litoestratigraficamente equivalente à Formação Sicasica (Altiplano nordeste) e às formações Huamampampa e Los Monos (Cordilheira Central e Oriental), cujas rochas foram posteriormente cobertas por depósitos deltáicos atribuídos às formações Tomachi e Toregua.

Segundo OLLER *et ai.* (1981 *apud* SORUCO, 2000), a Formação Tomachi corresponde a depósitos subaéreos a subaquosos de planície deltáica inferior e consistem em canais distributários e barras de desembocadura de canais distributários, que mostram geometria progradacional de nordeste a sudoeste da bacia. Esta unidade foi

depositada durante o Eo-Devoniano e Meso-Devoniano e seu contato com a Formação Tejeque é gradacional. Esta formação é litoestratigraficamente equivalente às formações Coipacucho (Altiplano nordeste) e Iquiri (Cordilheira Oriental e Subandino Sul). Segundo CARPENTER (1997 *apud* SORUCO, 2000) e PETERS *et al.* (1997a, b), as rochas geradoras da Formação Tomachi estão entre as mais ricas fontes de petróleo do mundo, apresentando alta qualidade de matéria orgânica, e correspondendo, potencialmente, à principal rocha geradora da Bacia Madre de Dios.

Esta sequência se encerra na região com sedimentos da Formação Toregua (LOPEZ-MURILLO, 1967 *apud* SORUCO, 2000), que correspondem principalmente a canais distributários e inter-distributários com influência mista, marinha e fluvial. Esta formação foi depositada durante o final do Devoniano e o Carbonífero. Possui equivalência litoestratigráfica com as formações Cumaná (Altiplano nordeste) e Itacua (Cordilheira Central). O limite entre as formações Tomachi e Toregua corresponde a uma discordância erosiva.

Seqüência Permo-Carbonífera

Este ciclo inicia-se com uma sequência basal arenosa de aproximadamente 50 m de espessura, atribuída à Formação Yaurichambi por ISAACSON (1995), composta de arenito com granulometria fina à média com poucas intercalações carbonáticas. No Altiplano, esta formação apresenta contato erosional com a Formação Toregua. Esta unidade correlaciona-se com a parte inferior da Formação Cangapi e provavelmente com o Membro Caiguamí da Formação San Telmo, no sudeste da Zona Subandina. Representa, provavelmente, desenvolvimento de dunas eólicas.

Segue-se uma sequência clástico-carbonática da Formação Copacapana, cuja espessura varia com a localização do poço (142 m em Pando X-1 e 296 m em Manuripi

X-1). Esta seqüência apresenta uma grande variação litológica como anidritas, siltitos esverdeados, argilitos e calcáreos (*mudstones, wackstones, packstones* e raros *grainstones*), e ocorre em todo o Altiplano. A Formação Copacabana equivale à parte superior da Formação Cangapi, no sudeste da Zona Subandina (SORUCO, 2000).

A vinculação de fósseis encontrados na Formação Copacabana, na Bolívia, como braquiópodos, moluscos, foraminíferos, conodontes, entre outros, com faunas similares do hemisfério setentrional, indica que a transgressão marinha representada por esta formação se iniciou muito antes no norte do país.

Seqüência Cretácea - Quaternária

Ainda hoje não foi possível obter uma descrição detalhada da estratigrafia das formações continentais do Jurássico ao Paleogeno na Bacia Madre de Dios. Como a estratigrafia das serras subandinas do norte está descrita com maior detalhamento, suas características principais podem ser estendidas a esta área.

Estima-se que, nesta área das serras subandinas, a Formação Beu (SCHAGINTWEIT *et ai.*, 1939 *apud* SORUCO, 2000), de idade possivelmente cretácea e de natureza eólica e fluvial, tem uma espessura maior que 500 m, se assentando de forma discordante sobre rochas paleozóicas de idade distinta. Discordantes sobre esta, prosseguem sedimentos deltáicos e costeiros das formações Eslabón (CANEDO-REYES *et ai.*, 1960 *apud* SORUCO, 2000) e Flora (PERRY *et ai.*, 1963 *apud* SORUCO, 2000), de idade cretácea que, juntas, podem ultrapassar os 300 m de espessura. Com estas duas formações conclui-se a sedimentação mesozóica.

A partir daí, um conglomerado basal inicia os depósitos fluviais neógenos da Formação Bala (SCHLAGINTWEIT *et al.*, 1939 *apud* SORUCO, 2000), de aproximadamente 200 m de espessura. O processo segue com as seqüências miocênicas

das formações fluvio-lacustres Quendeque (SCHLAGINTWEIT *et al.*, 1939 *apud* SORUCO, 2000) e Charqui (CANEDO-REYES *et al.*, 1960 *apud* SORUCO, 2000) que, em conjunto, passam de 4.000 m de espessura. Para concluir, sobrepõem-se conglomerados da Formação Tutumo (DÁVILA, 1964 *apud* SORUCO, 2000), de aproximadamente 700 m de espessura.

CARRASCO (1986) *apud* SORUCO (2000) nomeou como Formação Cobija um conjunto de argilas fluviais de cor cinza esbranquiçado, amarelo esverdeado e roxo. No território peruano foi encontrada grande riqueza de fósseis vertebrados do Mioceno tardio em sedimentos correlacionáveis com esta formação.

A maior parte da área está coberta por sedimentação recente da Formação Candelária (Formação Ifiapari no Peru), sobrepondo-se discordantemente os sedimentos neógenos da Formação Cobija. Esta unidade foi subdividida em três membros de acordo com LEYTON *et al.* (1989 *apud* SORUCO, 2000): o membro inferior, denominado Membro A, formado por um conglomerado basal polimítico com fósseis vertebrados remodelados, seguidos por níveis de areno-argilosos e capas de argila; o Membro B, predominantemente areno-argiloso com presença de paleocanais; e o Membro C, constituído por siltitos, culminando com o desenvolvimento de um paleossolo laterítico com concreções de hematita.

4.2 GEOLOGIA ESTRUTURAL E EVOLUÇÃO TECTÔNICA

A Cordilheira dos Andes é a mais extensa cadeia de montanhas do mundo, tendo mais de 7.000 km da Colômbia até a Terra do Fogo, na parte oeste do continente sul-americano, próximo do Oceano Pacífico. Em geral, a largura da Cordilheira é de 200 a 300 km, mas na parte central chega a mais de 600 km. Seu maior pico é o Aconcágua,

com 6.962 m de altitude, na fronteira da Argentina com o Chile. Apresenta significativas variações em sua geologia. Somando-se os efeitos do clima, que vai de subpolar, na Terra do Fogo, árido no centro, e tropical no Peru, Equador e Colômbia, as diferenças na paisagem se tomam marcantes (TEIXEIRA, 2000).

A tectônica de placas é o fenômeno geológico que forma a Cordilheira dos Andes através do movimento compressivo entre a placa oceânica de Nazca e a placa continental Sul-americana, que se movem uma contra a outra. Neste movimento, a placa oceânica, mais pesada, penetra por baixo da continental. Este processo, denominado de subducção, iniciou-se no período Jurássico e continua até os tempos atuais, evidenciado pelos terremotos e atividade vulcânica que ocorrem em toda a Cordilheira dos Andes. Ao longo do tempo geológico, a placa oceânica se funde, gerando magma, o qual atinge a superfície e causa vulcanismo. Outros processos geológicos resultantes da subducção são soerguimentos, falhamentos, e dobramentos das rochas da placa sul-americana.

Geologicamente, o desenvolvimento estrutural atual da grande bacia Amazônica pode ser explicado como resultado da subducção de baixo ângulo (5° a 10°) da placa de Nazca sob a placa Sul-americana, num segmento compreendido entre os paralelos 2° e 15° de latitude sul. Este processo teve início entre 5 e 10 Ma, no limite Mioceno-Plioceno, gerando uma série de importantes eventos morfo-estruturais que afetaram a bacia Amazônica. Considera-se, segundo reconstituições de HAMPEL (2002) *apud* BABY (1995), que a subducção da dorsal de Nazca afeta a bacia Amazônica desde 5 Ma, o que é confirmado a partir de seções sísmicas da Bacia Madre de Dios, onde se pode observar um *onlap* da parte superior do relevo sedimentar neógeno sobre o flanco SE do arco (BABY, 1995).

Nesse sentido, a configuração geológica que hoje apresentam as bacias andinas desenvolveu-se durante a evolução cenozóica da Cordilheira dos Andes, quando se

produziu o encurtamento compressivo de antearco, migrando lentamente até o oriente dentro do continente. Desta forma, desenvolveu seu relevo atual num lapso de tempo compreendido entre o Mioceno-Plioceno, com sua divisão em sub-bacias menores de ante-arco, entre elas, a Bacia Madre de Dios, compreendida numa fase mais tardia de sua evolução (TORRES, 2001).

A evolução morfogenética da Bacia Madre de Dios apresenta certa complexidade, por ter uma área extensa que apresenta contextos morfo-estruturais diferenciados (TORRES, 2001).

O primeiro desses contextos é dado pelas elevações montanhosas do Altiplano Andino, limitado a oeste pela Cordilheira Ocidental ou vulcânica, composta por uma série de vulcões, alguns extintos ou dormentes, outros ativos, e a leste pela Cordilheira Oriental, um cinturão de rochas dobradas e falhadas. O Altiplano Andino se encontra presente no sul do Peru, oeste da Bolívia, nordeste do Chile e noroeste da Argentina, comumente com 3.000 à 4.000 m de altitude.

O segundo ocorre na Zona Subandina, que compreende uma franja dos Andes que se estende a leste e norte da Cordilheira Oriental, formando serras que encerram vales férteis e bacias com altitudes entre 1.800 e 3.000 m.

O terceiro contexto refere-se à região de depressão que forma a Planície Amazônica, situada aos pés da Cordilheira Oriental, em seus flancos leste, noroeste e sudeste. São terras baixas, formadas por depressões, extensas selvas e escassamente povoadas, que sofreram etapas de basculamento por sobrecarga de sedimentos acumulados provenientes do ocidente. É nessa região que se encontra a Bacia Madre de Dios. Atualmente, estas movimentações continuam no mesmo sentido, porém com menor intensidade.

A Figura 2 mostra uma seção com as diferentes morfologias citadas acima.

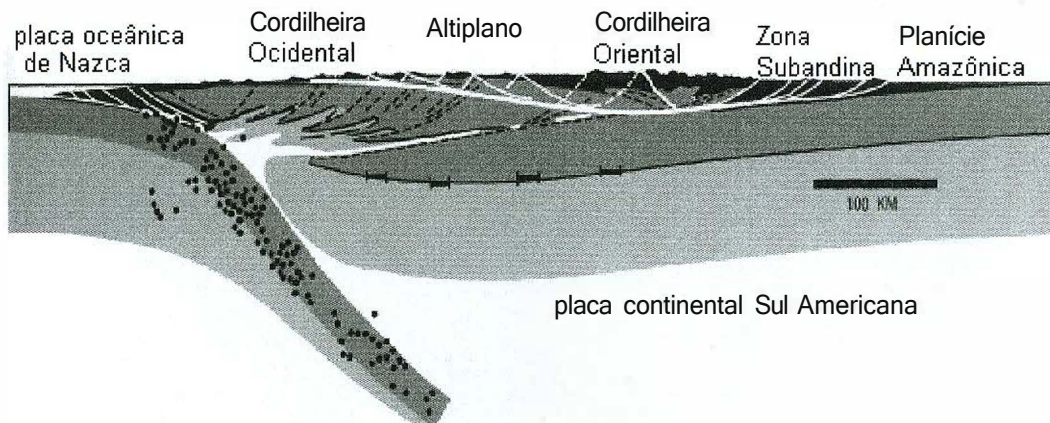


Figura 2 - Elementos estruturais do continente Sul-americano ao sofrer subducção da placa de Nazca (RAMOS, 2003).

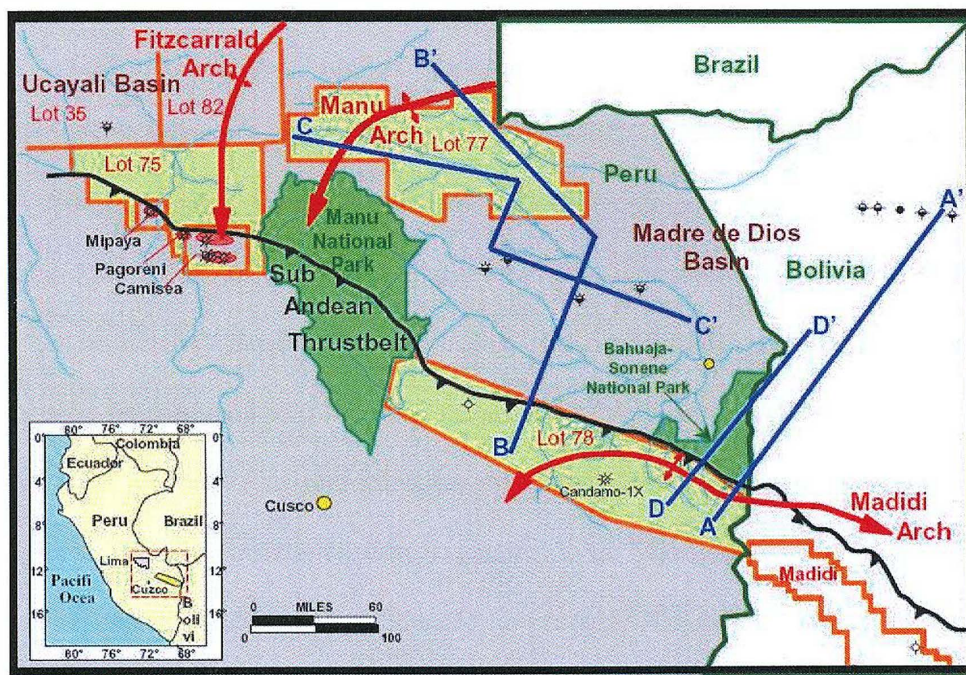


Figura 3 - Elementos estruturais referentes à Bacia Madre de Dios com suas principais estruturas em vermelho: arcos de Madidi, Manu e Fitzcarrald (HOUSE, 2000).

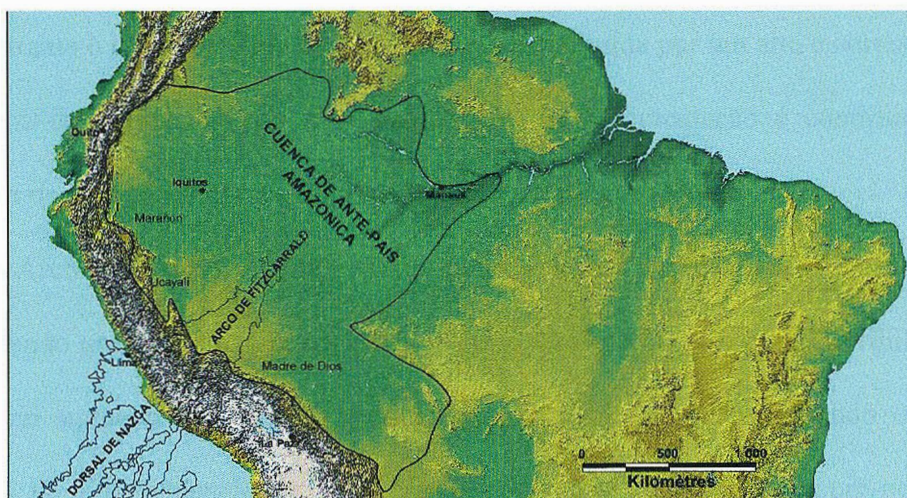


Figura 4 - O Arco de Fitzcarrald, que deforma grande parte da bacia Amazônica (BABY, 2005).

O Permo-Triássico é muito importante pelo início do funcionamento dos Arcos de Fitzcarrald, Manu e Madidi (Figura 3), os quais vão controlar, durante o Terciário, a seqüência temporal dos cavalgamentos, o estilo tectônico e a evolução petrolífera da Bacia Madre de Dios. Esforços compressivos Plio-Pleistocênicos geraram e reativaram falhas profundas, com blocos basculhados, cuja manifestação regional mais notória se encontra representada pelo Arco de Fitzcarrald, já criado anteriormente.

O Arco de Fitzcarrald constitui uma identidade morfológica de escala mega-regional na bacia Amazônica. Seu levantamento no Mio-Plioceno/Pleistoceno, estando provavelmente ligado com a subducção da placa de Nazca, provocou a separação das sub-bacias Madre de Dios e Ucayali, conforme esquematizado na Figura 4. Engloba em seu flanco SE o Arco de Manu, de idade pré-Mesozóico e de escala mais local.

O Arco de Manu é um alto estrutural que foi posto em evidência por anomalias gravimétricas de Bouguer, mapas magnéticos, assim como seções de reflexão e refração sísmica que indicam o adelgaçamento da seção sedimentar até o noroeste. Está erosionado e os depósitos cretáceos se opõem diretamente sobre o embasamento

cristalino. Segundo HOUSE (2000), o Arco de Manu havia se formado durante a desagregação do supercontinente Pangea, no Permo-Triássico.

Durante o início do Cretáceo, a região era constituída por um alto e correspondia a uma zona de aportes. Já no final do Cretáceo, a sedimentação é controlada pelas variações do nível do mar e pelo funcionamento do Arco de Madidi.

O Arco de Madidi é interpretado como a borda SE da bacia Madre de Dios apresentando um *trend* para oeste, desde o norte da Bolívia até o pé da Cordilheira dos Andes, no sudoeste do Peru. O arco parece ter idade Permiana baseado em dados sísmicos, no qual evidencia o truncamento estratigráfico dos sedimentos pré-permianos, como também, o afinamento no final do Permiano seguido de *downlap* de sedimentos Jurássicos-Cretáceos.

Ambos os arcos de Manu e Madidi, fizeram com que os sedimentos paleozóicos fossem completamente erodidos, expondo rochas do embasamento cristalino ao longo de seus eixos durante o Neo-Permiano até o período Cretáceo. A natureza angular dessa inconformidade é facilmente visualizada na sísmica.

Estes altos e as estruturas que os rodeiam, durante a evolução andina controlaram as deformações, sedimentações das bacias sedimentares, localização e desenvolvimento dos diferentes estilos estruturais, tanto nas cordilheiras como na Zona Subandina e porções da Bacia Madre de Dios. Inclusive, tais estruturas parecem ter controlado a migração de hidrocarbonetos até o Alto de Manu, nas Bacias Madre de Dios e Ucayali. Nesse contexto, os geólogos de petróleo recomendam realizar maiores explorações na bacia Madre de Dios, devido a altas concentrações de hidrocarbonetos no setor de Camisea, cercada pelo Alto de Manu, na bacia de Ucayali.

Como resultado dos eventos tectônicos mencionados, a área apresenta alguns lineamentos pequenos, somente identificados por fotointerpretação das imagens de

satélite. Essas prováveis falhas são normais, geralmente subverticais, com direção predominantemente NE-SO, afetam as camadas terciárias e os depósitos Plio-Quaternários. As tendências direcionais dominantes de caráter estrutural na área de estudo, se expressam mediante lineamentos de direção NO-SE, com linhas de comprimentos que vão de 2 a 8 km. Em geral, os falhamentos são relativamente recentes e mais ou menos ativos.

4.3 GEOLOGIA HISTÓRICA

A Bacia Madre de Dios constitui-se em uma província independente das vizinhas. Sua subsidência foi mantida durante todo o Fanerozóico (SORUCO, 2000). Preenche-se por sedimentos provenientes desde o Paleozóico até o Terciário (PETERS, 1997a). Quando o território das cordilheiras foi afetado pela tectônica andina, nos estágios de dobramentos e ascensão dos arcos, a Planície Amazônica submeteu-se a estágios de subducção, e a inclinação originada causou uma sobrecarga acumulada no sedimento a oeste. Hoje em dia estas ações continuam a ocorrer no mesmo sentido, porém com intensidade menor. A distribuição das rochas geradoras encontrada atualmente está ligada à deformação andina e à erosão mesozóica das unidades superiores (MORETTI, 1994).

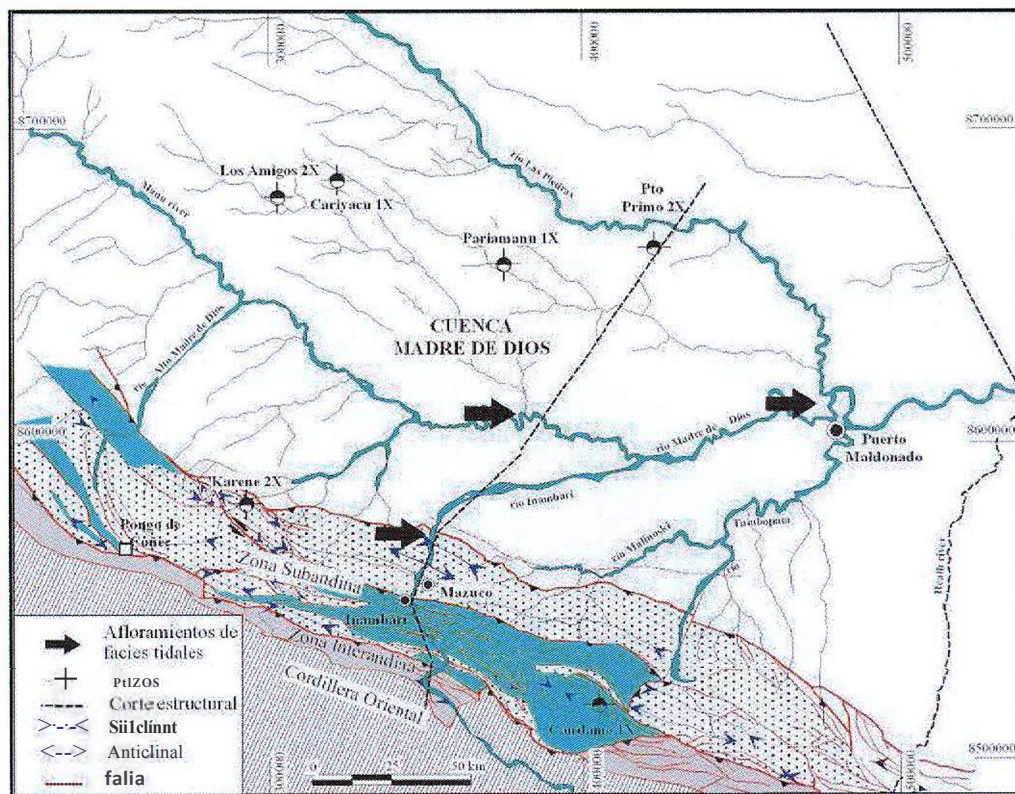
Nos períodos Ordoviciano a Devoniano, existia na área uma grande bacia, denominada bacia Amazônica, conforme mostrado na Figura 4. Esta bacia estava limitada por uma margem passiva com poucos aportes sedimentares a SW e outra margem a NE, ativa e de forte contribuição de aportes elásticos. As seqüências do Ordoviciano e Siluriano formam bons reservatórios fluvio-deltaicos, capeados por carbonatos marinhos. As seqüências geradoras do final do Devoniano possuem forte

potencial gerador, porém talvez estejam separadas das rochas reservatório por seqüências de folhelhos marinhos pobres do início do Devoniano. Por outro lado, arenitos marinhos depositados e remodelados durante o rebaixamento do nível do mar no Meso-Devoniano têm potencial para ser bons reservatórios, capeados pelas próprias geradoras devonianas, assim como as seqüências deltaicas com canais distributários formadas entre o Neo-Devoniano e o início do Carbonífero, sendo necessárias, entretanto, armadilhas estratigráficas, uma vez que as estruturais são raras (PETERS, 1997a).

Do Neo-Devoniano ao Carbonífero, se dá um levantamento da região hoje conhecida como cordilheira dos Andes Oriental. Durante o Neo-Devoniano ocorrem importantes aportes elásticos, levando a uma concentração maior das fácies ricas em matéria orgânica na região NW (que compreende hoje as bacias Madre de Dios e Subandino norte). No Carbonífero inicia-se uma transgressão marinha, dando origem a folhelhos ricos em matéria orgânica (MORETTI, 1994).

No Cretáceo, a convergência das placas continental e oceânica, com a conseqüente subducção desta última levou à formação de um cinturão de falhas de empurrão na região do retro-arco de ilha (PETERS, 1997a), que pode ser visto na Figura 5. Na Figura 6(b) pode-se observar que os horizontes de descolamento situam-se no Permiano S_{up} erior, enquanto que os deslocamentos das camadas se iniciaram por volta de 11 Ma, conforme será comentado mais adiante (BABY, 2005).

(a)



(b)

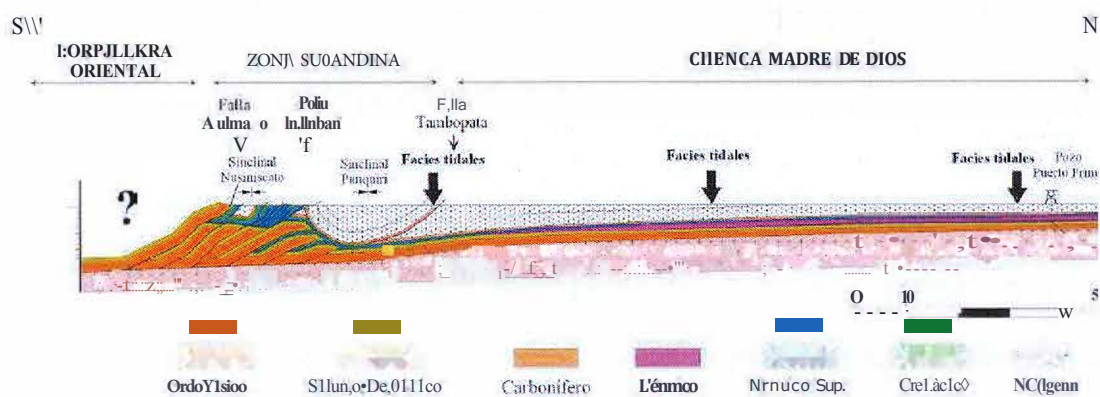


Figura 5 - (a) Mapa da região que compreende a bacia Madre de Dias e arredores, indicando a direção ao longo da qual se desenha a seção mostrada em (b) (BABY, 2005).

Como consequência deste tectonismo, deu-se um processo de subsidência da bacia durante o Oligoceno, que levou à maturação das rochas geradoras, tal como

representado no mapa da Figura 6 abaixo, que traz as regiões com geradoras classificadas em maduras e imaturas de acordo com os valores de reflectância da vitrinita (PETERS, 1997a).

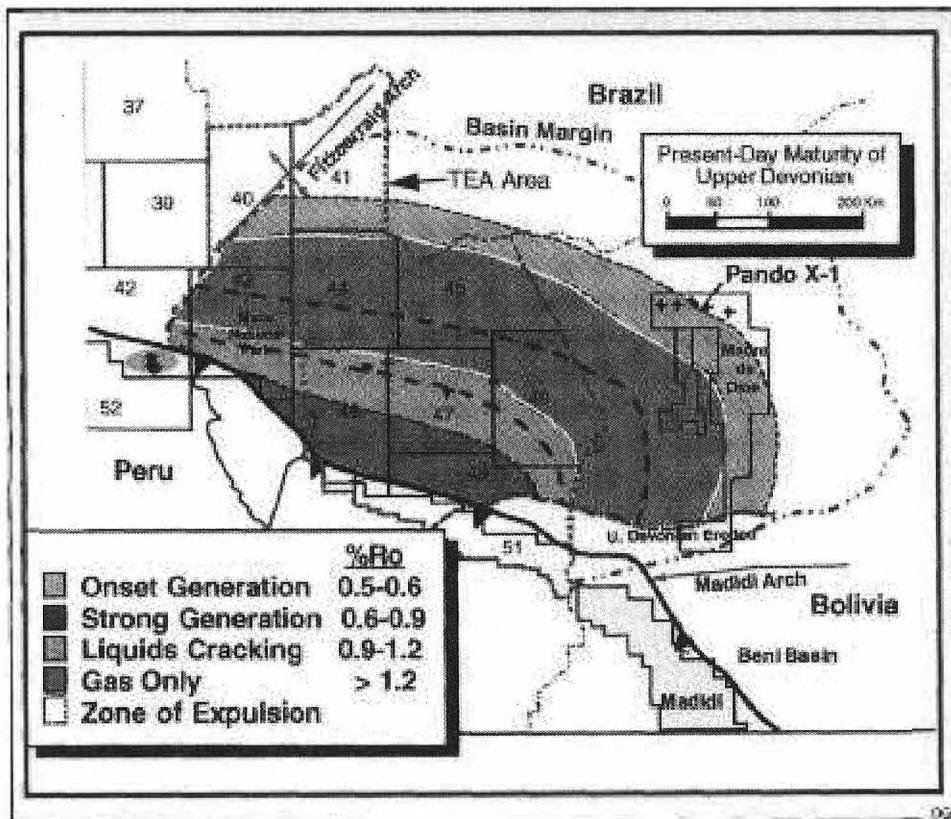


Figura 6 - Mapa da região da bacia Madre de Dias com dados de maturação térmica obtida a partir dos valores de reflectância da vitrinita (PETERS, 1997b).

O Mio-Plioceno é caracterizado pela subducção da dorsal de Nazca (cerca de 11 Ma), quando ocorreram uma série de eventos geológicos importantes, dentre os quais a ascensão da Cordilheira Oriental e da faixa subandina, assim como uma subdivisão da bacia Amazônica, então uma extensa unidade (vide Figura 4), em várias sub-bacias de ante-arco, entre elas a Bacia de Madre de Dios. Como uma das conseqüências mais marcantes desta evolução tectônica, surge o levantamento do Arco de Fitzcarrald (cerca de 10 Ma), o qual foi o responsável pela separação das bacias Ucayali e Madre de Dios no Peru (BABY, 2005). Dados sísmicos mostram uma forte variação na espessura destes

sedimentos em parte da bacia, na direção N-NE, devido à erosão ou ausência de deposição, o que pode ser interpretado como consequência do soerguimento do Arco de Fitzcarrald (BABY, 2005).

Oscilações climáticas intensas ocorridas no Pleistoceno influenciaram a região, com subidas e descidas do nível do mar (Figura 7). Presume-se que a primeira glaciação, nessa mesma época, produziu nas terras da região amazônica camadas paleogeográficas, onde as chuvas eram mais constantes (uma estrutura provavelmente decorrente deste fenômeno são os Pampas, de características morfológicas e climáticas particulares). Isto permitiu que em algumas regiões na base das montanhas fossem gerados taludes. As glaciações mais recentes causaram efeitos semelhantes, embora ocorrendo em tempos mais curtos.

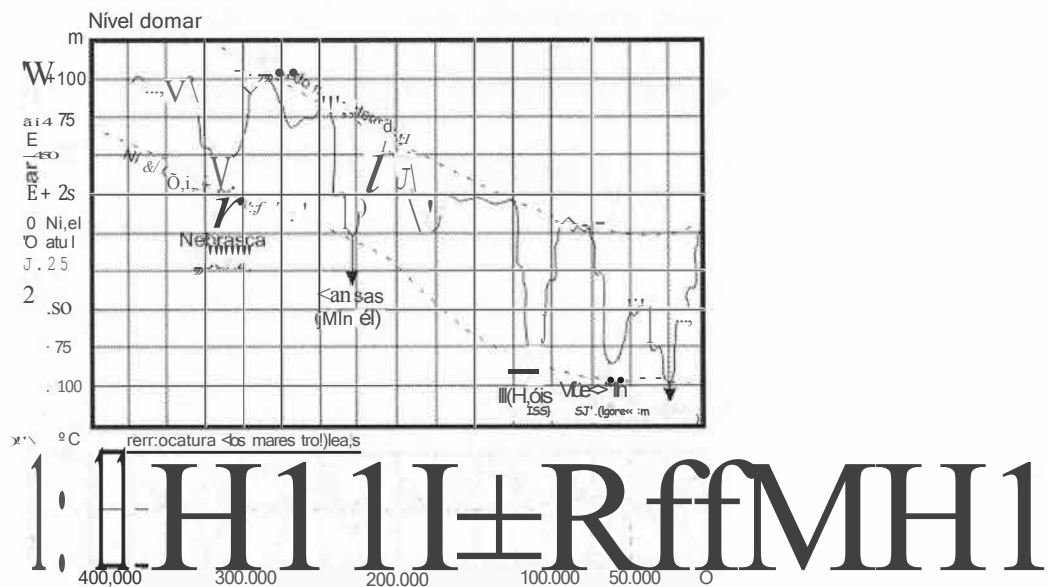


Fig. 3-7 - Oscilações climáticas pleistocênicas e implicações no nível marinho (Fairbridge, 1961).

Figura 7 - Oscilações climáticas pleistocênicas e implicações no nível marinho (FAIRBRIDGE, 1961).

No Holoceno ocorreu uma elevação gradual da temperatura atmosférica e a definição das configurações climáticas da Floresta Amazônica. Os processos de erosão

pluvial e distensão do relevo ficam reduzidos pela cobertura florestal do solo, com aumento do volume dos rios e, conseqüentemente, aumento das escavações do leito e erosões laterais, que são pronunciados nos alargamentos dos rios.

Hoje em dia, a maior parte da matéria orgânica preservada devido à anoxia é encontrada ao longo do eixo da bacia, em direção a NE (MORETTI, 1994).

4.4 GEOLOGIA DO PETRÓLEO

As rochas geradoras do final do Devoniano na bacia Madre de Dios estão, potencialmente, entre as rochas mais ricas em hidrocarbonetos no mundo. Essas rochas são mais ricas que as rochas do Jurássico Superior encontradas na região central da Arábia Saudita e do Mar do Norte e se encontram termicamente maduras por boa parte da bacia. Na região norte da Bolívia, a bacia apresenta rochas geradoras de grande extensão vertical e lateral, que atingiram o estágio de geração de óleo após a formação de armadilhas e selos (PETERS, 1997b). A Figura 8 mostra um quadro do sistema petrolífero na Formação Tomachi, do lado peruano.

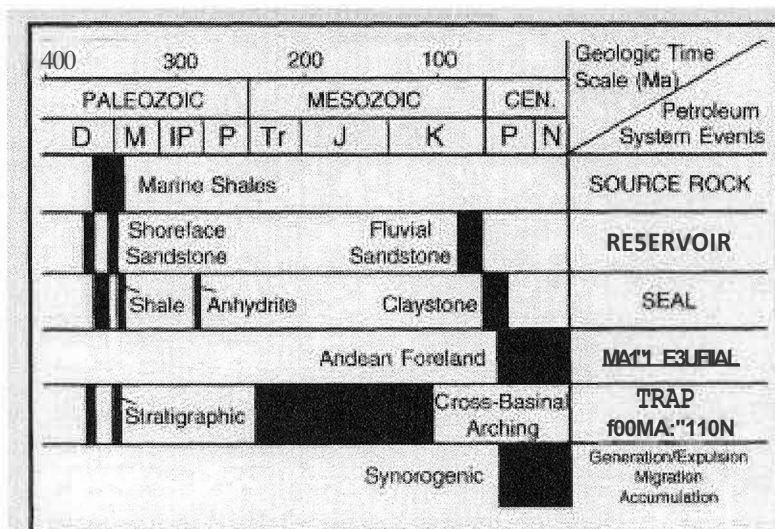


Figura 8 - Sistema petrolífero da Formação Tomachi (Peters, 1997b).

A sedimentação rica em matéria orgânica do período Eo-Devoniano na Bacia Madre de Dios é característica de um período de elevação do nível do mar em um ambiente marinho fechado. A deposição anóxica e um ambiente de baixa energia garantem a deposição em lâminas finas, sem bioturbação, favorecendo a preservação de matéria orgânica com altos índices de hidrogênio e baixos índices de oxigênio, conforme pode ser visto na Figura 9. No poço boliviano Pando-XI, o índice de hidrogênio medido varia de 400 mg HC/g COT (PETERS, 1997a) a 700 mg HC/g COT (MORETTI, 1994). A melhor fácies encontra-se na base da Formação Tomachi, com 200 m de espessura e um S₂ médio de 22 a 80 mg HC/g COT. Estes dados qualificam o querogênio presente nestas rochas como Tipo I/Tipo II (MATHALONE, 1995).

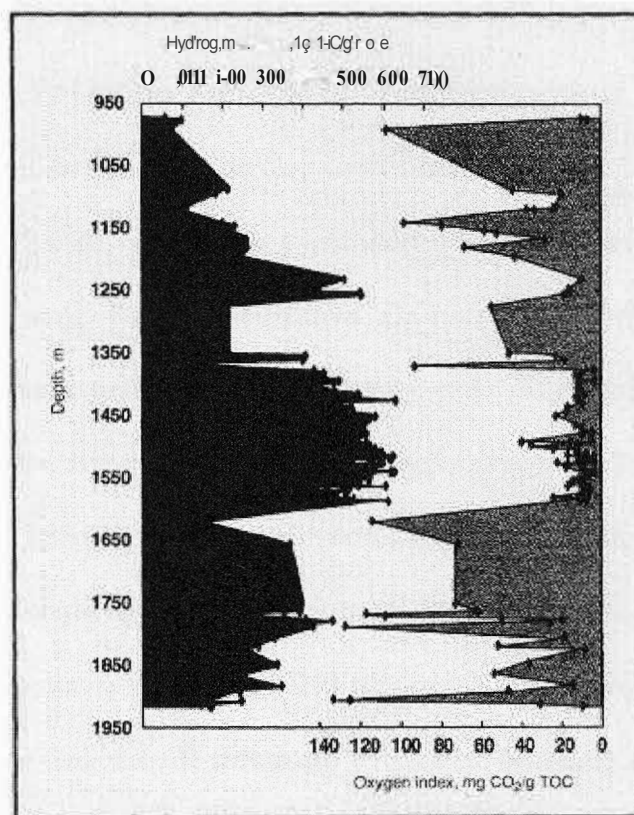


Figura 9 - Gráfico de índice de hidrogênio versus índice de oxigênio, de acordo com PETERS (1997b).

No Peru, a estratigrafia referente ao Carbonífero Superior e do Permiano Inferior geralmente tem potencial de rocha geradora mais baixo. A Formação Copacabana

consiste, principalmente, em uma plataforma de carbonatos pobre, com intercalações de folhelhos escuros ricos em algas, nos quais o conteúdo orgânico total (COT) pode exceder 4% em peso. Esta formação pode, portanto, ser uma fonte possível de óleo na bacia. Folhelhos referentes ao final do Cretáceo da Formação Chonta são parte das rochas propensas à geração de hidrocarbonetos, estendendo-se no noroeste da América do Sul, do Peru até a Venezuela. Na Bacia Madre de Dios, essa formação apresenta depósitos continentais de maior granulometria, com pouco potencial de rocha geradora (PETERS, 1997b).

Na Bolívia, a Formação Tomachi, do Eo-Devoniano, destaca-se como a principal rocha geradora da bacia, com um COT acima de 3,5% em peso (MORETTI, 1994), obtido pelo perfil geoquímico dos poços Pando-X1 e Pando-X2. Estima-se que a capacidade de geração total das rochas do Eo-Devoniano na Bacia Madre de Dios seja entre 250 e 1.000 bilhões de barris de óleo equivalente (PETERS, 1997b). Ainda assim, até o ano de 1997 apenas 10 de poços exploratórios foram perfurados na bacia, sem a descoberta de nenhuma reserva significativa. Os riscos advêm da dificuldade de se encontrar armadilhas estratigráficas e estruturais e da dificuldade de se realizarem explorações sísmicas devido à densidade da vegetação na região (PETERS, 1997b).

Essas rochas geradoras variam de imaturas para a geração de hidrocarbonetos no nordeste da bacia, com reflectância da vitrinita menor que 0,5%, a senis na direção sudoeste, com reflectância maior que 1,2% próximo ao cinturão de empurrão andino (vide Figura 6). Esta tendência de maturação é típica em bacias de antepaís assimétricas em todo o mundo e representa a resposta da matéria orgânica ao soterramento no Terciário associado à bacia de antepaís andina (PETERS, 1997b).

Tais rochas geradoras do Eo-Devoniano são sobrepostas por duas seqüências deltáicas do Eo-Devoniano e do Carbonífero Inferior, constituindo excelentes

reservatórios. Essas seqüências deltáicas são formadas principalmente por canais distributários e barras de canal, com progradação na direção nordeste-sudoeste para o interior da bacia. Infelizmente, devido ao mergulho da região e ausência de fechamentos estruturais, seria necessária a presença de armadilhas estratigráficas para que grandes volumes de hidrocarbonetos pudessem ser acumulados nesses arenitos de origem deltáica. Em todo o território da Bolívia há a presença de armadilhas estruturais relacionadas à formação da Cordilheira dos Andes durante o Terciário, porém a Bacia Madre de Dios está menos afetada pela compressão do que as demais bacias de antepaís e, portanto, toma-se mais difícil definir tais armadilhas estruturais (PETERS, 1997a).

Exudações de óleo ocorrem ao longo da extremidade leste dos Andes, do Equador à Argentina, como também, foram anunciados no sopé andino adjacente à bacia Madre de Dios (PETERS, 1997a).

A empresa norte-americana Mobil entregou suas áreas de exploração da Bacia Madre de Dios na Bolívia, principalmente devido à falta de armadilhas estruturais e por prever a necessidade de perfurar um grande número de poços antes de se atingir qualquer descoberta de interesse comercial. Porém, a companhia aumentou suas atividades no lado peruano da bacia. No Peru, o poço Pariamanu recuperou uma pequena quantidade de óleo 44-53° API de arenitos do Carbonífero, enquanto o poço Puerto Primo recuperou poucos barris de óleo 42° API de arenito Devoniano (PETERS, 1997b).

5 MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

5.1 Métodos Eletromagnéticos

Os métodos eletromagnéticos (EM) podem ser amplamente classificados em dois grupos: aqueles usando uma fonte de energia controlada, gerada pela atividade humana, e aqueles usando energia elétrica ou magnética de ocorrência natural como fonte. Os métodos de fonte controlada são mais comumente usados para investigações de alvos rasos, desde a caracterização de materiais superficiais para investigar resistividades em profundidades tão grandes como de 1 a 2 km, embora profundidades de investigação maiores sejam possíveis com algumas técnicas e sob algumas condições.

A resistividade da maioria dos solos e rochas, incluindo-se virtualmente de todas as rochas de interesse para a exploração de hidrocarbonetos, nas frequências utilizadas pelos métodos EM é controlada pelos fluidos contidos dentro das rochas. Isso decorre porque a matriz seca de solo ou rocha é um isolante virtual em frequências DC ou próximas a DC. O fluido dos poros é na maioria dos casos água com sais dissolvidos. A salinidade é um fator primário para a determinação da resistividade do fluido dos poros, sendo que a configuração dos poros também desempenha uma parte. De menor importância nas profundidades de reservatórios de óleo é a temperatura da formação. Óleo e ou gás, quando presentes, ocorrem em espessuras limitadas da formação e seus efeitos sobre a resistividade média do volume não são detectáveis na maioria dos casos.

Falhas ou fraturas de formações sedimentares porosas na maioria dos casos têm pouco efeito sobre a resistividade média do volume, uma vez que a porosidade adicional da fratura altera a porosidade já alta por somente uma pequena porcentagem. No

entanto, em rochas muito duras, tais como ígneas, metamórficas e rochas carbonáticas não porosas, onde a porosidade intrínseca é muito baixa, os fluidos nas juntas, quebras e zonas falhadas podem tomar-se caminhos de condução primários.

Os métodos EM de fonte natural tomam vantagem de potenciais elétricos e campos eletromagnéticos de ocorrência natural como fontes de energia. Vantagens de métodos de fonte natural são a não dependência de fontes de energia artificiais e o fato de que o campo eletromagnético natural é bem compreendido. As principais desvantagens são a não predictibilidade e a falta de controle sobre os níveis de energia e os efeitos decorrentes do ruído da atividade humana.

O método do potencial espontâneo - *self-potential, SP, method* - examina o campo potencial superficial que varia lentamente causado por ações eletroquímicas e eletrocinéticas em materiais próximos à superfície. Potenciais podem formar-se, por exemplo, em interfaces entre materiais contendo fluidos com diferentes conteúdos de íons, ou podem ser causados água subterrânea em movimento ou por oxidação diferencial de corpos minerais. Esse método foi aplicado com sucesso em exploração geotérmica e mineral e na delimitação de certos contaminantes de água subterrânea.

O método Magnetotelúrico MT é um método EM de exploração geofísica que faz uso de energia eletromagnética de ocorrência natural propagando-se no terreno para determinar-se a resistividade elétrica da subsuperfície. O campo eletromagnético de baixa frequência é medido, e a impedância da onda é calculada e expressa em termos da resistividade da subsuperfície. A profundidade da investigação é uma função da frequência da onda eletromagnética, tomando-se vantagem do princípio fundamental: quanto mais baixas as frequências de uma onda, maior é a profundidade de penetração na crosta. Sondagens MT geralmente envolvem aplicações que variam em profundidade desde poucas centenas de metros até 10km ou mais.

A seção de resistividade contra profundidade obtida a partir dos dados MT pode ser interpretada em termos do tipo de rocha. Variações espaciais na relação resistividade-profundidade observadas em localizações proximamente espaçadas na superfície podem ser interpretadas em termos da estrutura geológica de subsuperfície. Enquanto o método MT não pode ser usado para detectar óleo diretamente, a identificação dos tipos de rocha favoráveis e a presença de estrutura geológica capaz de armadilhar hidrocarbonetos é crítica para exploração bem sucedida. Os dados MT são interpretados utilizando-se técnicas de modelagem direta e inversa. A resolução é considerada baixa quando comparada com exploração sísmológica, porém pode ser adequada em certos casos para fornecer informações valiosas a respeito da geometria do reservatório e de características das rochas além de indicar um arcabouço geológico regional. Para os reservatórios em grande profundidade, o método MT pode ser considerado como um candidato possível para monitoramento do aumento de recuperação de óleo se os estudos do modelo indicarem que as alterações da resistividade em relação ao tempo associado à operação estejam dentro do poder de resolução do método.

Os métodos telúricos têm muitas das mesmas vantagens e desvantagens dos métodos gravimétrico e magnético, onde a fonte também é de ocorrência natural, porém podem fornecer uma dimensão adicional de informação fazendo uso de uma faixa de frequências (VOZOFF, 1964).

5.2 Características Do Método Magnetotelúrico (MT)

5.2.1 História

As correntes telúricas foram primeiramente reconhecidas a cerca de 140 anos atrás, e em breve tomou-se evidente que elas estavam associadas a pequenas flutuações do campo magnético da Terra. A primeira sugestão de que as correntes poderiam ser usadas para exploração foi aparentemente feita nos anos 1920. LEONARDON (1928) discutiu alguns dos princípios envolvidos, porém não foi até 1939 que os primeiros resultados foram apresentados por SCHLUMBERGER (1939). A quantidade medida foi a variação, com o tempo, da diferença de voltagem entre um par de eletrodos aterrados separados por poucas centenas de pés. A variação resulta da contínua mudança de direção e amplitude das correntes telúricas.

Três artigos publicados em 1950 mostraram que informação adicional poderia ser obtida medindo-se ambas as variações elétrica e magnética ao mesmo tempo. Finalmente, CAGNIARD (1953) publicou seu artigo teórico agora bem conhecido sobre exploração magnetotelúrica. Os conceitos fundamentais de CAGNIARD eram válidos para situações simples de camadas planas, porém o método alcançou um ponto onde ele é agora uma ferramenta quantitativa para exploração comercial, mesmo na presença de heterogeneidades laterais de grande escala. Resultados de campo apareceram primeiro em 1960.

5.2.2 Fontes de Campo

Correntes telúricas são encontradas aparentemente em toda parte na Terra em todos os tempos. Em princípio elas fornecem um meio para definir-se completamente a estrutura de condutividade elétrica de uma região sem gasto de energia. Somente os receptores são necessários.

Agora está bem estabelecido que a causa direta da alteração das correntes na Terra é a variação temporal do campo magnético. Deve ser enfatizado que "correntes telúricas" implica em correntes variando e "campos magnéticos" implica em campos magnéticos variando. Até onde se sabe o valor médio ou nível DC das correntes é zero, exceto próximo a locais de anomalias de potencial espontâneo. Campos magnéticos por outro lado têm uma enorme componente DC - o campo interno do núcleo - porém somente as mudanças rápidas, chamadas de pulsações, é que são pertinentes. As partes estacionárias podem ser excluídas limitando-se a discussão àquelas variações cujas frequências estão entre poucos ciclos por hora e poucos ciclos por segundo.

Também é sabido que os grandes eventos magnéticos na Terra originam-se da atividade solar, a qual causa correntes fluindo na ionosfera. Juntos, esses eventos criam grandes perturbações magnéticas na superfície e levam a correntes telúricas fluindo na Terra. As correntes originam seus próprios campos magnéticos, de tal maneira que as pulsações magnéticas observadas resultam de duas fontes - uma dentro da Terra sólida e outra em algum lugar externo.

5.2.3 Os Sinais

A maior parte do ruído magnético que alcança a Terra abaixo de 1 Hz é devida a fluxo de corrente nas camadas ionizadas da magnetosfera. As correntes são bombeadas pela atividade solar, e pelos movimentos relativos da Terra, do Sol e da Lua. Em frequências acima de 1 Hz, a atividade de tempestades elétricas dentro da baixa atmosfera em todo mundo é a maior contribuidora. Os campos transientes devidos às tempestades podem ser excessivamente grandes localmente, enquanto aqueles associados aos tornados são ainda maiores.

A magnetosfera, a região ao redor da Terra na qual o principal campo magnético é armadilhado pelo vento solar, inclui a ionosfera e a atmosfera e contém gases, especialmente oxigênio e nitrogênio, decrescendo em densidade com a elevação. Esses gases são ionizados pelo ultravioleta e outras radiações solares, porém abaixo de 100 km a alta pressão força os íons a recombinarem-se rapidamente de maneira que há poucos deles livres. Acima de 100 km, a densidade de partículas carregadas cresce rapidamente até cerca de 250 km e então começa a declinar novamente com o decréscimo da pressão e da densidade de partícula. Essa região de condutividade relativamente alta é chamada de ionosfera.

5.2.4 Procedimento de Campo

Uma sondagem de dados magnetotelúricos consiste na aquisição ao longo do tempo das duas componentes horizontais do campo elétrico, das duas componentes horizontais e da componente vertical do campo magnético, em uma rede unidimensional ou bidimensional de sítios em campo.

Dois pares de eletrodos alinhados em ângulos retos devem ser dispostos em cada sítio, assim como três magnetômetros mutuamente perpendiculares. O arranjo está mostrado esquematicamente na Figura 10. Os eletrodos fornecem baixa resistência e baixo ruído elétrico nas conexões com o terreno para as medidas do campo elétrico. (Embora usualmente o terreno seja considerado como estando no potencial zero, diferenças de potencial devem existir se as correntes telúricas fluírem, porque o solo tem uma resistividade finita, $e, j = Ed$). É possível que o campo elétrico sobre a superfície mude em ambas, direção e intensidade sobre distâncias muito curtas, devido a grandes mudanças laterais da resistividade próximo à superfície. Grandes espaçamentos de

eletrodos devem ser usados nessa situação para promediar as variações o tanto quanto possível, ou então os dados resultantes serão aplicados a condições que são muito localizadas para serem de algum uso. Para melhor promediação nessas circunstâncias é também importante que os dois pares de eletrodos formem uma cruz cujos quatro braços tenham seus comprimentos o mais próximo possível.

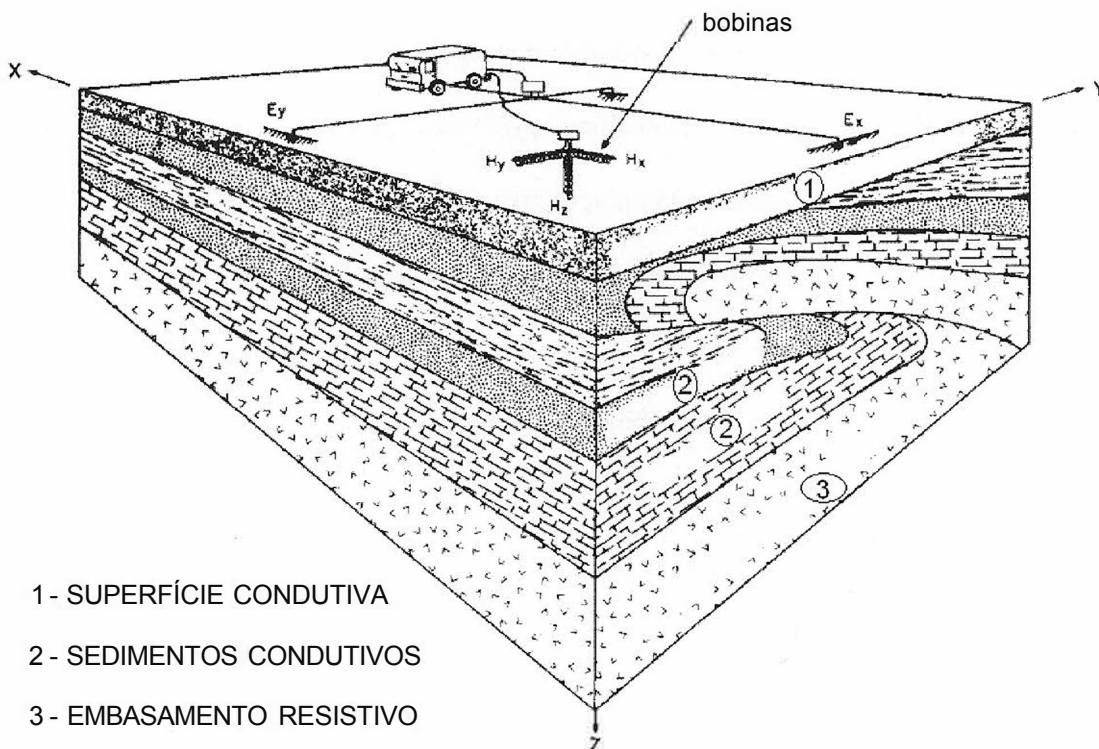


Figura 10 - Arranjo de Campo para sondagem MT (VOZOFF, 1972).

Os magnetômetros de bobinas de indução são mais sensíveis a movimentos que os fios conectores dos eletrodos. Para prevenir seu movimento ou vibração devido ao vento, as duas bobinas horizontais são encobertas em covas rasas, de 30 a 45 cm de profundidade. A bobina vertical é colocada em um buraco perfurado por um trado. As bobinas são niveladas por meio de bolhas de nível sensíveis dentro de uma fração de grau. O encobrimento das bobinas tem a vantagem adicional de reduzir os transientes térmicos e o ruído resultante.

5.2.5 Efeitos da Condutividade da Terra Sobre os Campos

Agora está bem estabelecido que os sinais podem ser tratados como ondas eletromagnéticas planas. Isso não será verdade sob todas condições, porém é verificada para a ampla maioria das situações geológicas de interesse na prospecção de petróleo. Embora a maioria da energia incidente seja refletida, uma pequena porção é transmitida para dentro da Terra e lentamente viaja verticalmente para baixo. Para as rochas condutoras, essa energia aparece como campo magnético o qual está variando no tempo, e campos elétricos são induzidos tal que correntes, chamadas de correntes telúricas, podem fluir.

A energia no movimento descendente é rapidamente dissipada como calor. Como resultado, a penetração do campo é relativamente pequena em termos do seu comprimento de onda no ar. O mecanismo de penetração nessa situação é na realidade difusivo ao invés da propagação de uma onda.

A profundidade de penetração dos campos na Terra está inversamente relacionada à condutividade das rochas. Em um terreno uniforme E e H diminuem exponencialmente com a profundidade; quanto maior a condutividade do terreno menor a penetração. A profundidade na qual os campos caem de (e^{-1}) dos seus valores na superfície é chamada de *skin depth* δ .

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \text{ m} \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ km} \quad (1)$$

onde f é a frequência, $\omega=2\pi f$, e μ é a permeabilidade magnética - μ na terra é tomado como sendo μ_0 permeabilidade do espaço livre, exceto em materiais altamente magnéticos.

Em um sub-solo uniforme e de camadas horizontais, todas as correntes, campos elétricos e magnéticos são praticamente horizontais, qualquer que seja a direção a partir da qual esses campos penetram. Isso resulta por causa da alta condutividade do terreno em relação ao ar. Esse comportamento pode ser imaginado em termos da lei de Snell da óptica, com a velocidade na sub-superfície sendo ordens de magnitude menor que fora. Além disso, nesse caso as correntes e campos elétricos estão em ângulos retos aos campos magnéticos associados em cada ponto.

5.2.6 Resistividade e Resistividade Aparente

Quando a resistividade p , ou a condutividade σ , é calculada a partir dos valores de das componentes horizontais E_x e H_y ,

$$P_a = \frac{1}{\omega \mu_0} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2}, \quad (2)$$

é chamada de resistividade *aparente* P_a , ou condutividade *aparente* σ_a , onde ω é a frequência e μ_0 é a permeabilidade do espaço livre. Essa expressão vale para os sistemas unidimensionais. p e P_a são relacionadas, porém elas devem ser claramente distinguidas. P_a é a resistividade que um terreno uniforme deve ter para dar o valor medido da impedância Z . p é a propriedade do meio, ao passo que P_a depende de como ele é medido. Enquanto p fornece a resistividade real de cada camada, P_a contém os efeitos de reflexão e atenuação de camadas superpostas. Se a resistividade p varia com a profundidade, a resistividade aparente P_a varia com a frequência, uma vez que as frequências mais baixas penetram mais profundamente.

Ao se discutir sobre os tipos de estrutura elétrica é útil definir-se estruturas bidimensionais e tridimensionais. No caso bidimensional [$\alpha = \alpha(x, z)$], a condutividade varia ao longo de uma coordenada horizontal e da profundidade. A outra direção horizontal é chamada de "strike". Quando a condutividade varia com ambas as coordenadas horizontais e com profundidade [$\alpha = \alpha(x, y, z)$], a estrutura é dita tridimensional e não tem "strike". Se α depende somente de z , a estrutura é unidimensional. Em cada caso, α em cada ponto pode depender da direção do fluxo da corrente; se α realmente depende da direção, o meio é anisotrópico.

5.2.7 TENSOR DE IMPEDÂNCIA E O "TIPPER"

As relações entre as componentes do campo em um único sítio estão sistematicamente contidas na impedância e no "tipper". A impedância e o "tipper" são as quantidades a partir das quais a estrutura da condutividade é determinada. As relações entre os campos são lineares.

$$\begin{bmatrix} E_x(\omega) \\ E_y(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx}(\omega) & Z_{xy}(\omega) \\ Z_{yx}(\omega) & Z_{yy}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x(\omega) \\ H_y(\omega) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$H_z(\omega) = \begin{bmatrix} T_x(\omega) & T_y(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x(\omega) \\ H_y(\omega) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Os campos elétrico e magnético são medidos no domínio do tempo, porém a análise é realizada no domínio da frequência.

5.2.7.1 Tensor de Impedância

A modelagem do tensor de impedância permite a solução das equações de Maxwell na Terra sólida e na atmosfera utilizando uma fonte de corrente horizontal na atmosfera para representar fontes da ionosfera e da magnetosfera.

Em estruturas bidimensionais, quando nenhum dos eixos coordenados está na direção do "strike", todos os quatro elementos do tensor de impedância Z_{ij} são não nulos e têm valores diferentes. Componentes do campo magnético na direção x dão origem a algumas correntes ao longo de x , além das correntes na direção y , as quais seriam as únicas se o terreno fosse uniforme ou fosse constituída por camadas horizontais. As componentes magnéticas y estão de maneira parecida associadas a ambos E_x e E_y , de maneira que Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} , e Z_{yy} irão todos ter valores finitos. Se os eixos coordenados forem girados, tanto fisicamente ou através de cálculos, até que um deles esteja ao longo do "strike", então as correntes devidas a H_x não mais serão defletidas na direção x e aquelas devidas a H_y fluirão somente na direção x . Nessa situação Z_{xx} e Z_{yy} devem ser nulos. As impedâncias do outro par Z_{xy} e Z_{yx} são não nulas e desiguais, uma vez que as densidades de corrente irão diferir nas duas direções. Se os eixos coordenados forem girados de tal maneira que o eixo x coincida com o "strike", então o tensor impedância toma a forma,

$$\begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^M & Z^S \end{bmatrix}, \text{ quando o eixo } x \text{ é paralelo ao "strike"}. \quad (5)$$

TE e TM referem-se às polarizações de campo Transversa Elétrica, onde o campo E é paralelo ao "strike", e Transversa Magnética, onde o campo H é paralelo ao "strike", respectivamente.

A direção do "strike" pode depender da frequência, porque na prática sua direção pode variar com a profundidade e cada frequência tem um *skin depth* diferente.

Entre as propriedades dos elementos da impedância, para estruturas 2D, estão,

$$Z_{xx} + Z_{yy} = 0 \quad (6)$$

$$Z_{xy} - Z_{yx} = \text{constante} \quad (7)$$

válidas para qualquer ângulo entre os eixos coordenados e o "strike". Para estruturas 3D, o equivalente às relações (6) e (7) são as relações,

$$Z_{xx} + Z_{yy} = \text{constante}, \quad (8)$$

$$Z_{xy} - Z_{yx} = \text{constante}. \quad (9)$$

Os Z_{ij} são inicialmente encontrados a partir dos dados transformados resolvendo-se as equações (3). Isso requer o uso de duas equações com quatro incógnitas. A aparente discrepância é resolvida tomando-se vantagem do fato que os Z_{ij} variam muito lentamente com a frequência. Os Z_{ij} são calculados como médias sobre faixas de frequência, onde cada faixa inclui muitos pontos da transformada, (Figura 11). Isso tem sido feito de várias maneiras, a mais comum delas é aquela descrita por Madden e Nelson (1964). Cada equação é escrita como,

$$\langle E_x A^* \rangle = Z_{xx} \langle H_x A^* \rangle + Z_{xy} \langle H_y A^* \rangle \quad (10)$$

$$\langle E_x B^* \rangle = Z_{xx} \langle H_x B^* \rangle + Z_{xy} \langle H_y B^* \rangle \quad (11)$$

Onde A^* e B^* são complexos conjugados de quaisquer duas das componentes H_x , H_y , E_x , e E_y , e CD^* é o produto cruzado de C e D ,

$$(cV^*)(OJ) = \frac{1}{2m+1} \int_{k=j-m}^{j+m} c_k V^* \quad (12)$$

onde j especifica a frequência central f_j da banda, e $2m+1$ o número de frequências dentro da banda. Cada banda está esquematizada na Figura 11.

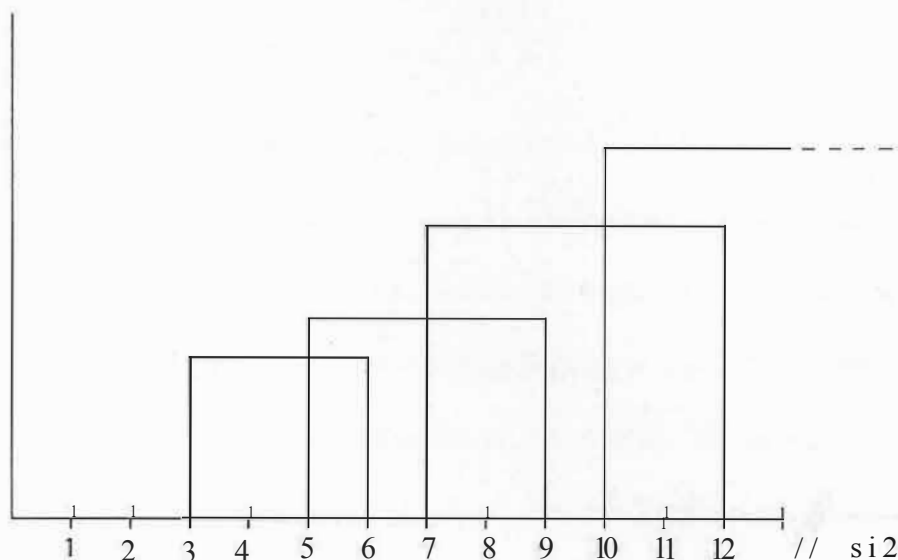


Figura 11 - *Bandas de frequência usadas para promediação, adaptado de (VOZOFF, 1991). Por exemplo, se houver um total de 512 frequências, podem ser selecionadas 19 bandas.*

Seis combinações diferentes são possíveis para escolha dos operadores C e D: (H_x , H_y ; H_x , E_y ; etc), tal que seis valores diferentes de cada Z_{ij} podem ser calculados. Mais comumente as duas componentes de H são usadas, pois elas são esperadas como apresentando o maior grau de independência, menor produto cruzado, que qualquer outro par.

Resolvendo-se as equações (10) e (11) obtém-se as seguintes quatro expressões a serem avaliadas:

$$Z_{xx} = \frac{\langle E_x A^* \rangle \langle H_y B^* \rangle - \langle E_x B^* \rangle \langle H_y A^* \rangle}{\langle H_x A^* \rangle \langle H_y B^* \rangle - \langle H_x B^* \rangle \langle H_y A^* \rangle} \quad (13)$$

$$Z_{xy} = \frac{(H_x A^*)(E_x B^*) - (H_x B^*)(E_x A^*)}{(H_x A^*)(H_y B^*) - (H_x B^*)(H_y A^*)} \quad (14)$$

$$Z_{yx} = \frac{(E_{y^A}') (H_{y^B} *) - (E_{y^B} *) (H_{y^A} *)}{(H_{x^A} *) (H_{y^B} *) - (H_{x^B} *) (H_{y^A} *)} \quad (15)$$

$$Z_{yy} = \frac{(H_{x^A} *) (E_{y^B}') - (H_{x^B} *) (E_{y^A} *)}{(H_{x^A} *) (H_{y^B} *) - (H_{x^B} *) (H_{y^A} *)} \quad (16)$$

Uma vez calculados os Z_{uv} , eles podem ser substituídos de volta nas equações (3) para se calcularem os valores de E_x e E_y . Esses valores, os quais são preditos a partir de H_x e H_y , têm a interessante característica de serem completamente dependentes do campo horizontal H . Portanto quaisquer diferenças entre o E observado e o E predito devem ser devidas à contaminação de tanto E ou H por ruído. Por essa razão, a coerência entre as componentes de E preditas e observadas provou ser a maneira disponível mais sensível de medir-se o ruído. Ela é vagamente chamada de *predictibilidade*. Em sítios comuns, uma *predictibilidade* de 0.95 ou maior é requerida para uma componente E como um dos critérios para a correspondente resistividade aparente aparecer nos gráficos finais.

Como notado acima, equações (6 - 9), ambos $(Z_{xx} + Z_{yy})$ e $(Z_{xy} - Z_{yx})$ são independentes do ângulo entre os eixos coordenados e o "strike", assim como a razão entre eles. O módulo dessa razão é o chamado *skew*,

$$S = \frac{|Z_{xx} + Z_{yy}|}{|Z_{xy} - Z_{yx}|} \quad (17)$$

Se S for grande, a estrutura naquele sítio deve ser tridimensional na faixa de frequência analisada.

Uma quantidade que varia com o ângulo θ entre os eixos coordenados é a *elipsidade* da impedância.

$$\beta(\theta) = \frac{|Z_{xx}(\theta) - Z_{yy}(\theta)|}{|Z_{xy}(\theta) + Z_{yx}(\theta)|} \quad (18)$$

Esta é zero, para dados livres de ruído, no caso 1D e no caso 2D quando o eixo x ou y está ao longo do "strike". A elipsidade da impedância, assim como o skew, é usada para indicar se a resposta em um sítio é 3D.

5.2.7.2 "Tipper"

Usualmente $H_z \approx 0$, exceto próximo a mudanças de condutividade lateral, onde $\nabla \times E$ tem uma componente vertical. Nesse caso a relação entre H_z e as componentes horizontais do campo magnético em qualquer frequência podem ser escritas como indicado em (4), onde os elementos T_i são complexos uma vez que eles podem incluir deslocamentos de fase. Dada uma estrutura 2D com "strike" na direção x' , em tais coordenadas a equação (4) simplifica-se para

$$H_z = T'_y H'_y \quad (19)$$

Aqui T' é chamado de "tipper". T' é certamente zero para o caso 1D. O módulo de T' é raramente tão grande quanto 1, sendo que 0,1 e 0,5 constituem uma faixa comum. O uso do "tipper" ajuda a resolver a ambiguidade na determinação do "strike" e mostra qual lado de um contato é mais condutivo.

5.2.8 Curvas de Resistividade Aparente

Um aspecto do método MT é que ele deve usar uma ampla faixa de frequência para ser efetivamente interpretado. As curvas de resistividade aparente são suaves e regulares quando elas são graficadas em escalas log-log. Escalas semi-log ou lineares originam inclinações muito íngremes em frequências muito baixas e inclinações

achatadas sem utilidade em altas frequências. Desde que as transformadas de Fourier normalmente aparecem em uma escala de frequência linear, enquanto a interpretação é feita em uma escala de frequência logarítmica, é útil calcular os produtos cruzados (12) em bandas cujas frequências centrais sejam igualmente espaçadas em uma escala logarítmica. Se n tais bandas são desejadas em cada década de frequência, a razão entre as frequências centrais de bandas adjacentes é

$$\log \frac{f_{i+1}}{f_i} = \frac{1}{n} \quad (20)$$

A largura de banda, em termos do número de pontos das transformadas, deve também aumentar com a frequência para suavização consistente em uma escala de frequência logarítmica.

Além dessa maneira, envolvendo médias no espaço da frequência, para o cálculo dos quatro elementos do tensor impedância, há outra maneira: promediando-se medidas repetidas no tempo, pois os Z_{ij} não irão alterar-se com o tempo. Essa abordagem alternativa não será detalhada.

Em estruturas geoeletricas bidimensionais, as quais são caracterizadas por "strike", define-se duas resistividades aparentes as quais são associadas aos modos TE e TM. Em primeiro lugar o tensor impedância é girado até que um dos eixo coordenados, por exemplo o eixo x , coincida com o "strike", e então utilizam-se os elementos não diagonais do tensor impedância, equação (5),

$$\rho_a^{TE}(\omega) = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z^{TE}(\omega)|^2 \quad \text{e} \quad \rho_a^{TM}(\omega) = -1 - \frac{Z^{TM}(\omega)}{\omega\mu_0} \quad (21)$$

As curvas de resistividade aparente associadas aos modos TE e TM são mais sensíveis às variações verticais e horizontais da resistividade, respectivamente.

Em uma estrutura 3D não muito diferente de uma 2D, onde ainda seja possível definir uma direção onde os contornos gerais da estrutura definam um "strike", as curvas de resistividade aparente são calculadas da mesma maneira.

5.2.9 Sobre o Problema do Auto-Estado Magnetotelúrico

Toda a informação inerente ao tensor de impedância magnetotelúrico pode ser sistematizada e concentrada nas chamadas direções ótimas através de métodos relacionados ao problema do auto-estado (BERDICHEVSKY, 1999). O modelo bidimensional é o ponto de partida. Toma-se o eixo x coincidindo com o "strike" do modelo 2D. Então o tensor de impedância toma a forma expressa na equação (5).

Donde,

$$E_x = Z^{TE} H_y, \quad E_y = Z^{TM} H_x, \quad (22)$$

onde Z^{TE} e Z^{TM} são as componentes longitudinal e transversal do tensor Z orientadas ao longo e perpendicular ao "strike". É natural considerar os valores Z^{TE} e Z^{TM} como *valores principais*, autovalores, e as direções longitudinal e transversa como *direções principais*, autodireções, do tensor de impedância magnetotelúrico. Nesse contexto, os campos E_x , E_y , H_x e H_y , linearmente polarizados nas direções longitudinal e transversa, manifestam-se como *autocampos* do tensor de impedância magnetotelúrico. O tensor bidimensional Z tem dois pares de autocampos:

$$\begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ H;tl \end{bmatrix} \text{ e } \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ E;2i \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} H \\ E \end{bmatrix} \quad (23)$$

Em cada par o autocampo elétrico é a transformada do autocampo magnético.

Essas representações exibem três propriedades características do tensor de impedância magnetotelúrico 2D: (1) o tensor de impedância reduzido às suas direções

principais tem zero na diagonal, (2) os vetores elétrico e magnético em cada par são mutuamente perpendiculares - a perpendicularidade $E-H$, $E-H$, e (3) os vetores elétricos de diferentes pares de autocampos são mutuamente perpendiculares, assim como os vetores magnéticos de diferentes pares de autocampos são mutuamente perpendiculares - a perpendicularidade $E-E$, $H-H$. Isso fornece subsídios para a generalização do problema do auto-estado magnetotelúrico para o modelo 3D.

Atualmente três métodos para resolver o problema do auto-estado são os mais utilizados na comunidade geoeletrica: (1) o método da rotação, (2) o método da ortogonalização e (3) o método da diagonalização.

O método da rotação é bastante simples. Ele busca a rotação do tensor que minimiza a diagonal da matriz. Aqui o tensor 3D é aproximado pelo tensor 2D. Os cálculos resultam na determinação dos valores e das direções principais.

Os métodos de ortogonalização e diagonalização reduzem-se à detecção de autocampos perpendiculares. As direções dos autocampos são encontradas como direções dos eixos maiores das elipses dos autocampos polarizados. No método da ortogonalização procura-se por autocampos elétrico e magnético com perpendicularidade $E-H$, $E-H$. Esse método é uma modificação da formulação clássica do auto-estado. No método da diagonalização procura-se por autocampos com perpendicularidade $E-E$, $H-H$.

Ambos os métodos oferecem procedimentos puramente matemáticos que "carregam" algumas propriedades do modelo 2D para o modelo 3D, e a discussão sobre o seu significado físico é um pouco acadêmica. O desafio é encontrar relações entre indicações de auto-estados e propriedades de estruturas geoeletricas.

5.2.10 Inversão

Uma boa referência para se entender o problema da inversão é o livro de TARANTOLA (2005). Idéias elementares são apresentadas a seguir.

Dada uma descrição completa de um sistema físico, é possível prever o resultado de algumas medidas. Esse problema de prever o resultado de medidas é chamado de *problema de modelamento* ou *problema direto*. O *problema inverso* consiste em estimarem-se os valores dos parâmetros que caracterizam o sistema, a partir de medidas ou observações de campo.

Enquanto o problema direto tem, na física determinística, uma solução única, o problema inverso não tem. Como um exemplo, considere medidas do campo de gravidade ao redor do planeta: dada a distribuição de massa dentro do planeta, é possível prever univocamente os valores do campo da gravidade ao redor do planeta, problema direto. Porém há diferentes distribuições de massa que originam *exatamente* o mesmo campo de gravidade no espaço exterior ao planeta. Portanto, o problema inverso - de inferir a distribuição de massa a partir das observações do campo de gravidade - tem soluções múltiplas, de fato, um número infinito.

Por causa disso, no problema inverso, precisa-se tomar explícita qualquer informação disponível a priori sobre os parâmetros do modelo. Deve-se também tomar cuidado na representação das incertezas dos dados. A informação a priori é transformada em informação a posteriori, incorporando-se a teoria física - a qual relaciona os parâmetros do modelo a alguns parâmetros observáveis - e o verdadeiro resultado das observações com suas incertezas.

Em geral, nos problemas de inversão, a informação conhecida a priori e os dados observados não são suficientes para discriminar uma solução única. Impõe-se então a

chamada condição de suavização, que seleciona a solução onde os parâmetros do modelo sofram as menores variações. Isso não quer dizer que essa condição de suavização forneça a melhor solução possível. Em um certo sentido essa solução é uma promediação das soluções compatíveis com os dados observados e com o modelo conhecido a priori.

5.2.11 Inversão-MT 3D

A base conceitual por trás do método MT consiste no fato de campos elétricos e magnéticos naturalmente induzidos variarem com a posição e a frequência de uma maneira que depende do campo da fonte e da estrutura da resistividade elétrica da Terra. *A dependência com a fonte, no entanto, é efetivamente eliminada considerando-se a razão entre os campos elétrico e magnético, a qual é chamada de impedância.* Medidas de impedância em várias frequências e em várias localizações podem ser usadas para criar imagens da distribuição da resistividade elétrica da subsuperfície a qual depende, por exemplo, da litologia, fluido dos poros, temperatura e variações químicas.

Atualmente a maioria das interpretações MT são realizadas utilizando-se algoritmos de inversão 2D. Enquanto esses algoritmos mostraram-se úteis e efetivos para interpretação de dados MT, é raro encontrar dados MT que sejam verdadeiramente 2D. De fato é mais comum os dados MT de campo mostrarem influência e distorção de estruturas 3D.

Até recentemente, a ferramenta primária disponível para interpretação MT completamente tridimensional era a modelagem direta através de tentativa e erro. Essa abordagem foi usada para interpretação de dados de campo com algum sucesso, porém é um processo laborioso e que demanda bastante tempo. Uma dificuldade é o tamanho do

problema: conjuntos de dados 3D multiestação e multifrequência tipicamente compreendem milhares de medidas de impedância, e um grande número de parâmetros do modelo é necessário para o ajuste os dados. Adicionalmente, a não linearidade do problema direto torna muito difícil a predição de mudanças necessárias dos parâmetros para ajustarem-se os dados e dar conta das "compensações", "*trade-offs*", complicadas entre os parâmetros. Essas dificuldades são severamente agravadas pelo esforço computacional intenso da modelagem direta MT 3D.

O algoritmo de inversão MT 3D baseado no chamado método dos gradientes conjugados não lineares - *non linear conjugate gradients* NLCG - automatiza o processo de ajuste dos dados MT para modelos terrestres 3D em um processo de inversão rápido e robusto.

5.3 Estudo de Caso

Não foi encontrado nenhum trabalho publicado sobre aplicação do método magnetotelúrico na Bacia Madre de Dios. Nesta monografia será apresentado um estudo de caso baseado em uma aplicação do método na Bacia de Cinturões de Cavalcamento do Sul da Bolívia (RAVAULT, 2002). Inicialmente será apresentada uma breve descrição de características geológicas da Bacia de Cinturões de Cavalcamento (DUNN, 1995), em seguida, o estudo de caso, e finalmente serão feitas uma comparação de diferenças e semelhanças entre as duas bacias e uma sugestão de aplicação na Bacia Madre de Dios.

5.3.1 DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DA BACIA

A zona Subandina do sul da Bolívia é um dobramento de antepaís ativo e um cinturão de cavalcamento na margem leste do orógeno Andino, (Figura 12). O cinturão Subandino Sul tem aproximadamente 150 km de largura e 400 km de comprimento e é caracterizado por uma série de eixos anticlinais direcionando-se ao norte ou nordeste com expressões estreitas na superfície. O estilo estrutural de cordilheiras longas e estreitas sugere uma estratigrafia contínua e horizontes de deslocamento eficientes. O encurtamento Andino começou no final do Oligoceno e foi transmitido à zona Subandina após 10 Ma. O surgimento da bacia de antepaís coincide com a deposição das últimas unidades do Oligoceno e primeiros conglomerados do Mioceno. Superfícies de mergulho conformes e refletores sísmicos sugerem que a sequência estratigráfica inteira no Subandino Sul, incluindo o grupo conforme do Chaco no Mioceno, foi dobrada na época Mioceno-Plioceno. Na bacia de antepaís, uma não conformidade

dentro do grupo Chaco e um crescente adelgaçamento e truncamento sobre anticlinais em desenvolvimento tem imagens bem feitas a partir de dados sísmicos. Isso sugere dois eventos compressoriais distintos ocorrendo após 10Ma.

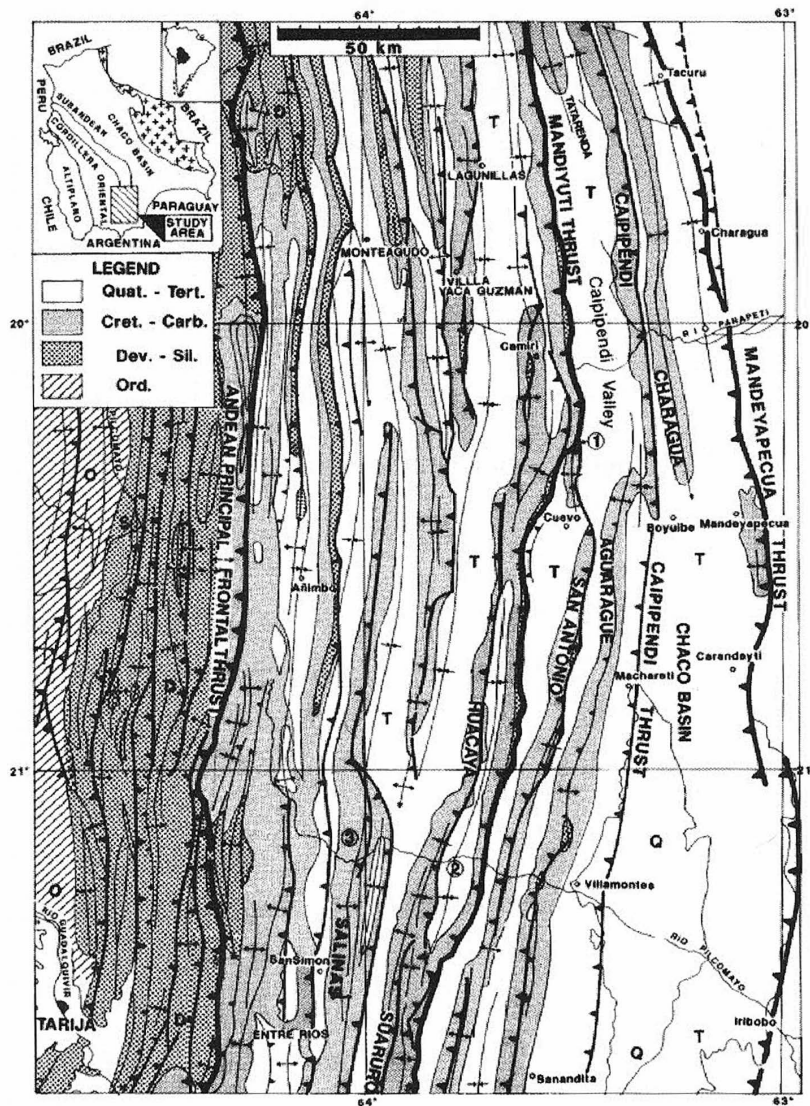


Figura 12 - Mapa geológico generalizado do cinturão Subandino Sul mostrando cordilheiras lineares de montanhas (sombreado), falhas de cavalgamento (principais falhas enfatizadas) e eixos anticlinais e sinclinais, (DUNN,1995).

53.1.1 Estratigrafia

A rocha fonte primária do cinturão de cavalgamento do Subandino Sul é a espessa sequência de folhelhos marinhos da Formação Los Monos do Devoniano. Os

reservatórios que são o alvo primário na área são os arenitos Carboníferos das Formações Tupambi, Chorro e Escarpment com porosidades variando de 11% a 21%. Os reservatórios que são o segundo alvo são os arenitos da Formação Iquiri do Devoniano Superior com porosidades variando de 8% a 17%. Alguns campos também produzem a partir dos arenitos da Formação Huamampampa do Devoniano inferior, onde as porosidades raramente excedem 10%. Folhelhos regionais espessos das Formações Itacuami, Taiguati e San Telmo e folhelhos intraformacionais da Formação Iquiri do Devoniano fornecem bons selantes. Os cavalgamentos basais deslocam-se na Formação Kirusillas do Siluriano, e horizontes deslocados mais altos repousam sobre a Formação Los Monos, sobre a Formação Icla do Cinturão Subandino ocidental e localmente na Formação Ipaguazu do Permiano.

53.1.2 Avaliação Geoquímica

Embora folhelhos de vários intervalos estratigráficos mostrem características de rochas fonte, incluindo o Siluriano, Devoniano, Permiano e Cretáceo, o trabalho com biomarcadores consistentemente mostra que os vazamentos de óleo e os óleos produzidos dos sopés Subandinos e do antepaís do Chaco correlacionam-se com rochas fonte do Paleozóico Médio. As Formações Los Monos-Iquiri do Devoniano Médio e Kirusillas do Siluriano Superior são identificadas como rochas fonte potenciais baseadas no conteúdo de carbono orgânico total (COT), pirólise Rock-Eval e análises de biomarcadores. Ambas as sequências são amplamente difundidas através de toda região Subandina e dentro do antepaís do Chaco com eixos da bacia localizados próximos à extremidade leste do sopé Subandino.

A Formação Los Monos do Devoniano é uma rocha fonte marginal, cujo baixo conteúdo orgânico total (COT), menos que 2%, é compensado pela sua grande espessura estratigráfica. Os folhelhos da formação Los Monos-Iquiri são caracterizados por um querogênio marinho-terrestre misto do tipo II-III depositado sob condições subóxicas, com potencial misto para gerar óleo e gás. Fácies e análise geoquímica de Los Monos mostram que, em geral, ele é mais fino (<200 m), mais arenoso e menos propenso à óleo no sul e no oeste ao longo do fronte Andino e que ele é mais espesso (>600-700 m), com mais folhelho e mais propenso à óleo em direção ao leste através do cinturão Subandino e dentro da bacia de antepaís. No entanto, poços individuais mostram que há zonas de querogênio mais propenso a óleo, tais como aquelas encontradas no poço Guairuy-X24 na Cordilheira Sararenda ao longo de uma faixa estrutural prospectiva no bloco Caipipendi. Um exemplo do poço Nupuco-X1, mais a leste na bacia de antepaís, também mostra enriquecimento relativo de querogênio.

5.3.1.3 Potencial de Hidrocarboneto

Análise geoquímica e modelagem mostram condições favoráveis para geração de óleo, migração e armadilhamento nas partes central e leste do Cinturão de Cavalgamento Subandino sul. A sincronia de geração, migração e armadilhamento é ótima porque o cavalgamento formou as armadilhas a medida que as rochas fonte estavam aproximando-se da janela do óleo por encobrimento e carga de sedimentos Terciários, (Figura 13). Embora a rocha fonte primária seja de qualidade marginal, a sua grande espessura permite a geração de significativas quantidades de óleo. Há também corredores de rocha fonte de mais alta qualidade ao longo de faixas de prospecção. Mais importante, há evidência direta substancial de óleo nos sopés Subandinos com muitos

vazamentos de óleo ativos e 16 campos em produção, incluindo Camiri e Monteagudo, dois dos maiores campos de óleo no país, cada um com reservas de cerca de 50 milhões de barris de óleo recuperável.

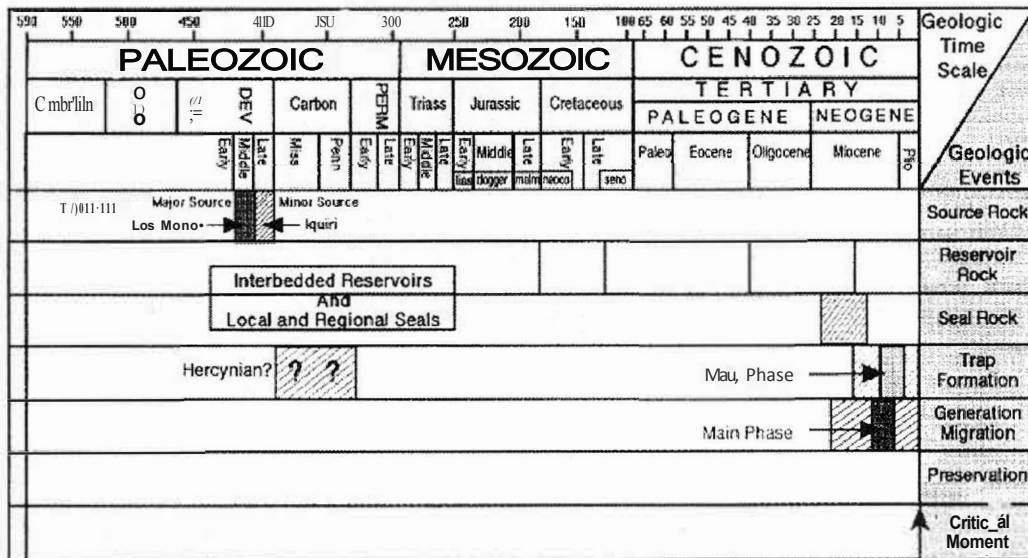


Figura 13 - História Geológica da área Caipipendi. Esta carta mostra sincronia favorável de fonte, reservatório e deposição de selante para sincronia de geração, migração e armadilhamento de óleo. Embora o sistema de rochas fonte e reservatório seja relativamente antigo, o pico da geração não ocorreu até o Terciário quando as armadilhas foram formadas, permitindo a preservação do hidrocarboneto, (DUNN, 1995).

5.3.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO 3D

Um dos principais problemas exploratórios nos contrafortes Subandinos é a obtenção de boa imagem sísmica da estrutura geológica abaixo dos eixos anticlinais. Isso é principalmente devido à baixa relação sinal-ruído dos dados sísmicos, os quais são degradados por efeitos de topografia íngreme e camadas geológicas com inclinações quase verticais. Considerou-se, portanto, a possibilidade da integração de outros dados geofísicos no programa de exploração para reduzir-se as incertezas. Em outubro de 2001, a TotalFinaElf Exploration Production Bolívia, e seus parceiros Grupo BG e

ExxonMobil, adquiriram sondagens magnetotelúricas em 70 estações e dados de gravidade em 297 estações em uma rede regular sobre a sua descoberta Itau. O objetivo da sondagem foi principalmente testar e avaliar o potencial desses métodos para criar imagens profundas da seção Paleozóica dentro da estrutura Itau: arenito do Carbonífero, as rochas-fonte de folhelhos Los Monos do Devoniano e o reservatório de arenito fraturado Huamampampa. Resultados da inversão 3D dos dados MT mostram que uma sucessão elétrica correspondente à unidade geológica esperada pode ser identificada dentro do eixo anticlinal com uma precisão de profundidade equivalente ou melhor que aquela de dados sísmicos 2D.

Até o momento, a sísmica 2D e especialmente a migração pré empilhamento em profundidade havia sido a única ferramenta usada para tentar identificar o topo do reservatório Huamampampa de arenito do Devoniano. Análises de resistividade de poço mostram a existência de um significativo contraste entre a Formação condutiva Los Monos (20-30 Ohm.m), o reservatório resistivo Huamampampa (100-150 Ohm.m) e a unidade Carbonífera vista em afloramento, Figura 14. Essa figura apresenta a seção transversal da estrutura Itau, a qual ilustra o estilo estrutural da deformação do Subandino Sul. A partir dessa análise decidiu-se testar o método sobre a área do poço Itau-XI em uma nova abordagem MT 3D.

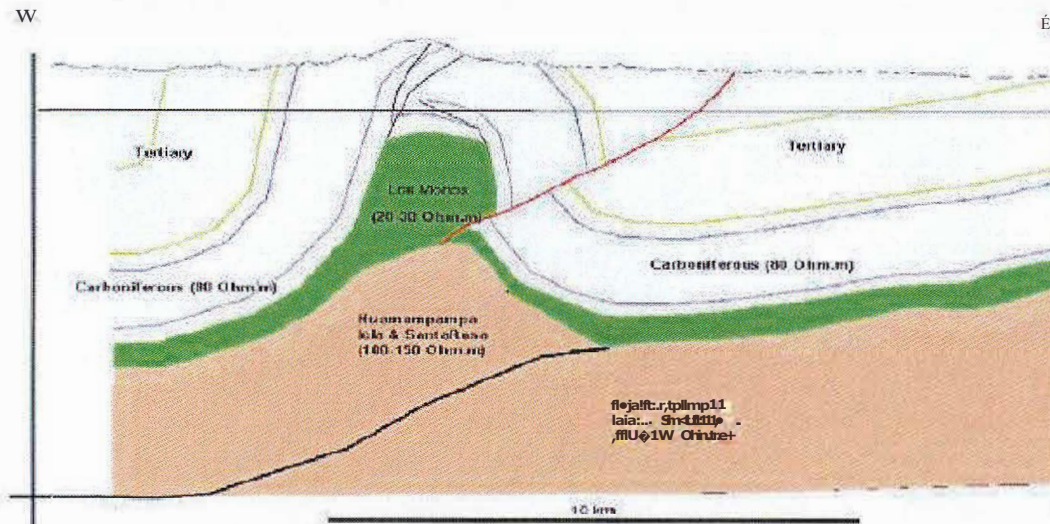


Figura 14 - Seção geológica transversal da estrutura tau e distribuição de resistividade média. Esta seção transversal corresponde à linha MT M03, ver Figura 15. Santa Rosa, leia, Huamampampa e Los Monas são unidades do Devoinano, (RAVAUT, 2002).

5.3.2.1 Aquisição dos Dados

Sondagens MT foram adquiridas em outubro de 2001 em cinco perfis SE-NW com uma distância de 2 km entre os perfis, perfazendo total de 70 estações de sondagem (Figura 15). O espaçamento entre as estações ao longo dos perfis foi de 1 a 1,5 km. O sistema Metronix ADU-06 foi usado para aquisição de dados, registrando em duas bandas, taxas de amostragem de 512 e 64 Hz, durante um total de 16 horas. Os dados de gravimetria adquiridos na mesma ocasião que os MT não foram incorporados à análise MT.

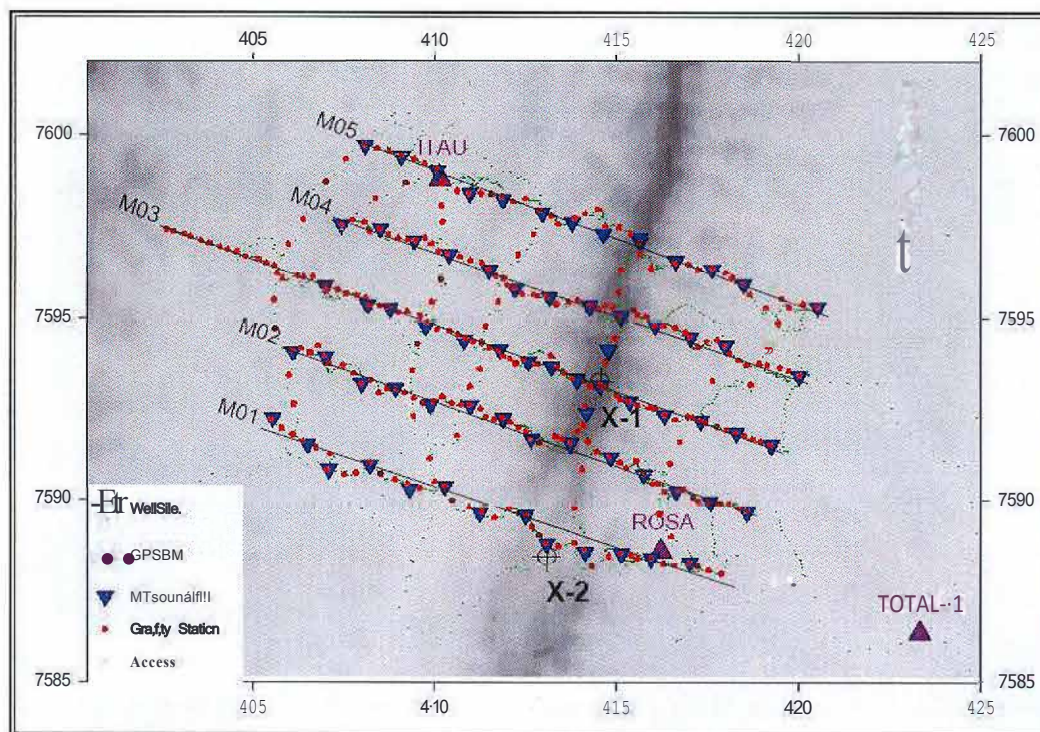


Figura 15 - Localização de τ XI e estações MT mostradas em uma imagem em escalas cinza de topografia, (Ravaut, 2002).

5.3.2.2 Interpretação dos Dados

Inversão 2D: O processo de interpretação iniciou-se com uma inversão 2D. Começando com um semi-espço homogêneo e uniforme de resistividade 25 Ohm.m, alcançou-se um bom ajuste entre os dados observados e modelados. Na linha M03 o resultado da profundidade do resistor do Devoniano é localmente consistente com os dados de poço com erro de 500 m (Figura 16). Porém, na maioria dos modelos observou-se um mistura dos resistores Carbonífero e Devoniano, especialmente no flanco oeste do anticlinal, devido à condição de suavização aplicada no modelo pelo código de inversão.

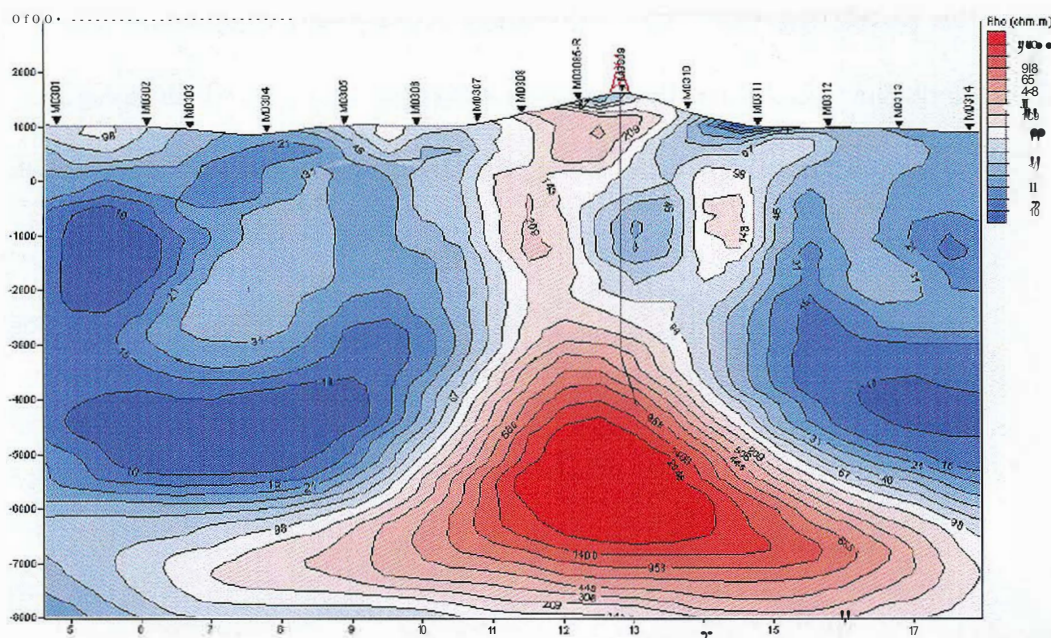


Figura 16 - Inversão 2D suave da linha tau M03, (RAVAUT, 2002). Eixo vertical: profundidade em metros, eixo horizontal: distância em quilômetros.

A inversão 3D foi realizada utilizando-se o programa descrito por MACKIE (2002). O sistema de coordenadas foi orientado para coincidir com o "strike" geolétrico. Dois modelos iniciais diferentes foram usados: um semi-espaço uniforme de 25 Ohm.m, e um modelo não uniforme no qual um modelo geológico simplificado foi incorporado. O dado de entrada foi o tensor impedância em dez frequências equidistantes entre 0.003 e 100 Hz.

A inversão suave, começando com um semi-espaço uniforme, resultou em modelos, os quais embora ajustem muito bem os dados, foram similares aos modelos da inversão 2D. Isso é devido ao fato de que duas unidades resistivas estão presentes, Carbonífera e Devoniana, separadas por um condutor razoavelmente fino, a Formação Los Monos. O procedimento de inversão tende a combinar os dois resistores em uma tentativa de satisfazer o critério de suavidade, porém ao fazer isso elimina muito da informação que é geologicamente útil. Maior sucesso foi obtido quando o modelo de partida foi baseado na extrapolação ao longo do "strike" de um modelo 2D simplificado.

As maiores mudanças em relação ao modelo inicial são a parte superior do Devoniano e os condutores do Terciário nos lados dos anticlinais, Figura 17. O resultado mostra que os dados de campo têm alta sensibilidade à parte condutiva da seção. Porém, baixa

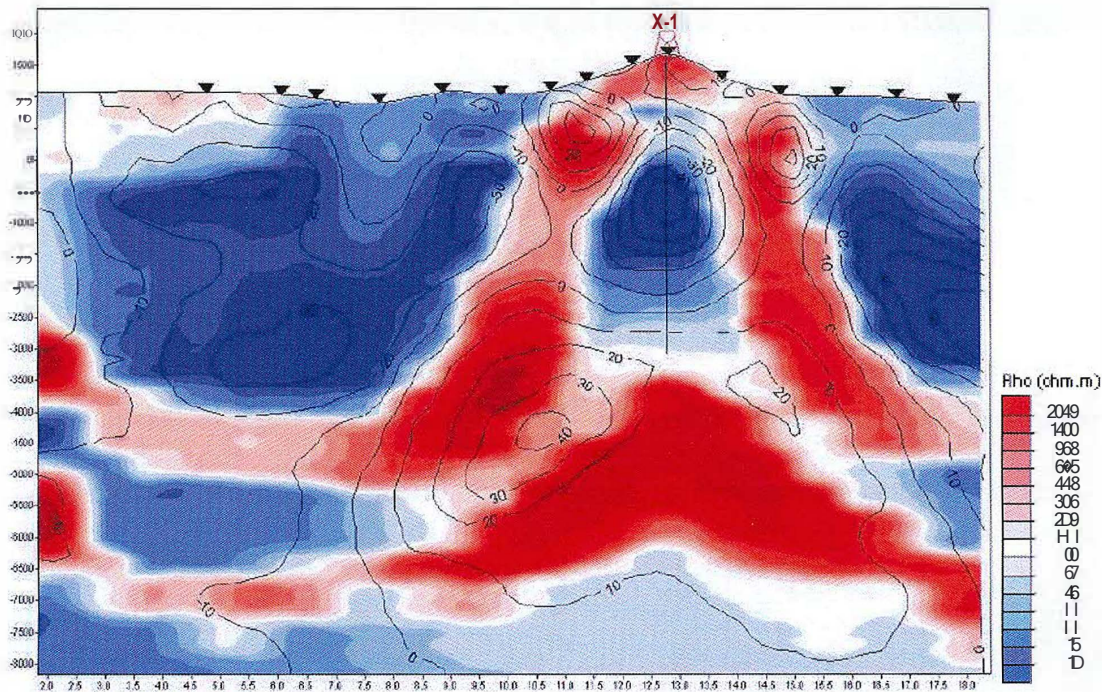


Figura 17 - Seção final da inversão 3D ao longo da linha !tau M03. Contornos superimpostos mostram a mudança percentual do logaritmo da resistividade entre os modelos inicial e final, (RA VA UT, 2002). Eixo vertical: profundidade em metros, eixo horizontal: distância em quilômetros.

sensibilidade aos resistores. Portanto, a posição do alvo resistivo é bem definida pela posição do condutor subjacente, porém sua resistividade é menos bem determinada. A Figura 17 mostra os resultados ao longo da linha M03 com a superimposição da mudança percentual a partir do modelo inicial. As máximas mudanças nas profundidades de interesse estão próximas do topo do Devoniano, o resistor mais baixo.

5.3.2.3 Considerações Finais

A primeira aplicação do método MT para criar imagens de estruturas complexas geológicas do sul da Bacia Subandina na Bolívia fornece uma imagem geofísica consistente dessa estrutura anticlinal por um custo moderado quando comparado com dados sísmicos. No entanto, para alcançar uma resolução útil da profundidade e precisão foram necessários:

1. Usar uma abordagem de inversão 3D;
2. Vincular a distribuição de resistividade;
3. Usar um modelo geológico consistente a priori.

Os resultados mostram que os dados observados contêm uma quantidade significativa de informação sobre a posição do alvo, a Formação Huamampampa do Devoniano. O método MT "refinou" o modelo geológico que se conhecia a priori.

5.3.3 Possível Aplicação do Método Magnetotelúrico na Bacia Madre de Dios

As Bacias Subandinas, Madre de Dios e dos Cinturões de Cavalgamento do Sul da Bolívia são caracterizadas por estruturas geológicas diferentes: a primeira apresenta poucas deformações estruturais, Figura 3, e a segunda é fortemente dobrada, Figura 12.

Por outro lado há semelhanças importantes entre as duas bacias. As principais rochas fontes dessas duas bacias estão associadas a formações Devonianas, as quais decorrem de um momento geológico de transgressão marinha consequente de uma elevação global do nível do mar. Os sistemas petrolíferos associados às formações da principal rocha geradora de cada uma das duas bacias-Formação Tomachi da Madre de Dios e Formação Los Monos dos Cinturões de Cavalgamento - estão indicados nas Figuras 8 e 13. Em segundo lugar, como foi mencionado na seção 4.1, a Formação

Tequeje da Bacia Madre de Dios é litoestratigraficamente equivalente às Formações Huamampampa e Los Monos dos Cinturões de Cavalgamento, e a Formação Tornachi da Bacia Madre de Dios é litoestratigraficamente equivalente à Formação Iquiri dos Cinturões de Cavalgamento.

Uma vez que há semelhanças estratigráficas, há uma expectativa de que também verifiquem-se contrastes de resistividades semelhantes. Os contrastes de resistividade entre formações sobrepostas são necessários para ser possível o discernimento das superfícies de contato entre essas formações.

Entende-se portanto que as duas Bacias deveriam fazer parte de uma mesma grande bacia no Período Devoniano, e que mais recentemente, no Terciário, os Cinturões de Cavalgamento surgiram devido à orogenia Andina. A Bacia Madre de Dios permaneceu com deformações menores, os três arcos: Fitzcarrald e Manu no Peru, e Madidi na Bolívia e no Peru (Figura 3).

Uma vez que os três arcos são as estruturas da Bacia Madre de Dios mais parecidas com os Cinturões de Cavalgamento, ainda que arcos e cinturões sejam unidades distintas, propõe-se então que as estruturas abaixo dos arcos sejam exploradas. Nesse contexto, o método magnetotelúrico 3D poder ser útil para refinar a determinação do topo de um eventual reservatório.

Como mencionado na seção 4.2, o arco de Fitzcarrald surgiu como consequência de a placa de Nazca conter uma dorsal aproximadamente perpendicular à Zona de Subducção, Figura 4. Seu levantamento ocorreu no Mio-Plioceno e Pleistoceno, enquanto os arcos Manu e Madidi, anteriores, surgiram respectivamente no Permiano-Triássico e no Cretáceo Superior. Temporalmente o levantamento do arco de Fitzcarrald está muito mais próximo dos eventos de dobramentos do Subandino Sul, os quais são do Mioceno-Plioceno, que os levantamentos dos arcos Manu e Madidi. O arco de

Fitzcarrald pode ser um candidato mais forte a satisfazer o requerimento de sincronia temporal do surgimento da armadilha estrutural, a qual pode surgir durante a migração do hidrocarboneto.

6 CONCLUSÕES

Na primeira parte desta monografia o autor teve contato com o estudo de uma Bacia Subandina de antepaís, a Bacia Madre de Dios, através de trabalho em grupo. Na segunda parte, houve a possibilidade de se adquirir noções elementares do método magnetotelúrico.

Na terceira parte foi feito o estudo de caso da estrutura Itau localizada na Bacia dos Cinturões de Cavalgamento do sul da Bolívia, a qual é distinta da Bacia Madre de Dios. Apesar da diferença estrutural, as principais rochas geradoras das duas bacias são do Devoniano e têm sua origem em um período de transgressão marinha global.

Neste estudo de caso da estrutura Itau foi necessária a inversão 3D do método magnetotelúrico ao invés da inversão 2D, apesar de as camadas geológicas formarem aproximadamente uma estrutura 2D, onde o "strike" está definido pela direção dos eixos anticlinais. Os cálculos de modelagens 2D e 3D indicaram **que** para se estimar com maior precisão o topo do reservatório Huamampampa são necessárias as informações adicionais disponíveis através do método 3D.

No trabalho analisado no estudo de caso, o método MT 3D teve êxito porque incluiu o conhecimento a priori de um modelo geológico consistente e dados de resistividade obtidos a partir de perfilagem de poços.

Entre as poucas deformações da Bacia Madre de Dios estão três arcos. Apesar de os arcos serem unidades distintas de cinturões de cavalgamento, eles são os primeiros candidatos a serem apresentados como possíveis reservatórios. O método magnetotelúrico 3D poderia ser útil na exploração desses três arcos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BABY, P.; HERMOZA, W.; NAVARRO, L.; BOLANOS, R.; ESPURT, N.; RODDAZ, M.; BRUSSET, S.; WILLY, G. Geodinamica Mio-Plocena de las cuencas subandinas peruanas: um mejor entendimiento de los sistemas petroleros, V INGEPET 2005.

BERDICHEVSKY, M. N. Marginal Notes on Magnetotellurics. **Surveys in Geophysics**, v. 20, pp. 341-375, 1999.

CAGNIARD, Louis. Basic theory of the magneto-teluric method of geophysical prospecting. **Geophysics**, v.18, pp. 605-635, 1953.

DUNN, J. F.; HARTSHORN, K. G.; HARTSHORN, P. W. *Structural styles and Hydrocarbon potential of the sub-Andean thrust belt of southern Bolivia*. **Petroleum Basins of South America: AAPP Memoir**, v. 62, pp. 523-543, 1995.

EGÚSQUIZA, R., 2004. Peru - Hydrocarbon exploration promotion in the fold thrust belt - Madre de Dios basin. Disponível em: WWW.SYSTEMDIGITAL.COM/PERU/PDF/M.%20DE%20DIOS%20A.PDF. Acesso em: 16 de Abril de 2007.

FAIRBRIDGE, R.W. Eustatic changes in sea level, **Physics and chemistry of the earth** 4, p.99-185, 1961.

OVIENDO-GÓMEZ, C.; MORALES-LAVADENZ, R. Compendio de Geologia de Bolivia - Cap. 8 Potencial de hidrocarburos, **Revista Técnica de Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos** v.18 n.1-2 p.145-167, 2000.

HERMOZA, W. Dynamique tectono-sédimentaire et restauration séquentielle du rétro-bassin d'avant-pays des *Andes centrales*. Tese de Doutorado apresentada na Universidade Paul Sabatier de Toulouse III (2004).

HOUSE, N.J.; CARPENTER, D.G.; CUNNINGHAM, P.S.; BERUMEN, M, 2000 Influence of Paleozoic Arches on Estrutural Style and Stratigraphy in the Madre de Dios Basin in Southem Peru and Northern Bolivia. Mobil Exploration and Producing Peru, Inc. Disponível em: [HTTP://SCITATION.AIP.ORG/GETABS/SERVLET](http://SCITATION.AIP.ORG/GETABS/SERVLET). Acesso em: 20 de dezembro de 2006.

IHS Energy Company - ONLINE ORDERING SERVICE. Latin America. Madre de Dios basin. North América, 1995. 1 mapa. Disponível em: [HTTP://NOTESRES.IHSENERGY.COM/PRODUCTION/PETRONET/SUPPORT/MAPS.NSF/WEBFRAMESET?OPENFRAMESET&SONLINESHOPS®ION=LATIN+AMERICA](http://NOTESRES.IHSENERGY.COM/PRODUCTION/PETRONET/SUPPORT/MAPS.NSF/WEBFRAMESET?OPENFRAMESET&SONLINESHOPS®ION=LATIN+AMERICA). Acesso em: 14 de Março de 2007.

ISAACSON, P. E.; PALMER, B. L.; COOKE, J. C.; SANDERS, D. E. *Devonian-Carboniferous Stratigraphy in the Madre de Deus Basin, Bolivia: Panda X-1 and Manuripe X-1 wells*, in A. J. Tankard, R. Suárez S., H. J. Welsink, **Petroleum Basins of South America: AAPP Memoir** v.62, p.231-249, (1995).

JAILLARD, E.; HÉRAIL, G.; MONFRET, T.; DÍAZ-MARTÍNEZ, E.; BABY, P.; LAVENU, A.; DUMONT, J. F. Tectonic Evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia, and Northernmost Chile, **Tectonic Evolution of South America**, Rio de Janeiro, pp. 481-559, (2000).

LEONARDON, E. G., Some observations upon telluric currents and their applications to electrical prospecting. **Terr. Mag.**, v. 33, pp. 91-94, 1928.

MACKIE, R. L.; RODI, W.; WATTS, M. D. 3-D magnetotelluric inversion for resource exploration. Artigo PF3.3, Extended Abstracts, Ann. Mtg. SEG, San Antonio.

MATHALONE, J. M. P.; MONTOYA, R. M. Petroleum Geology of the Sub-Andean Basins of Peru, in A. J. Tankard, R. Suárez S., H.J. Welsink, **Petroleum Basins of South America: AAPP Memoir** v.62, p.423-444 (1995).

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. República del Perú. Cuencas sedimentarias em el Peru - información general, 2001. 1 tabela. Disponível em: WWW.MINEM.GOB.PE/ARCHIVOS/OGP/PUBLICACIONES/ATLASMINERIAEN ERGIA2001/HIDROCARBUROS/TABLAOI DGH.PDF. Acesso em: 21 de Maio de 2007.

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. Disponível em: www.minem.gob.pe/mineria/pub_public03.asp Acesso em: 30 de Junho de 2007.

MORETTI, I.; DIAZ MARTINEZ, E.; MONTEMURRO, G.; AGUILLERA, E.; PEREZ, M. Las rocas madre de Bolivia y su potencial petrolífero - Subandino-Madre de Dios-Chaco, **Revista Tecnica de Yacimientos Petroliferos Fiscales Bolivianos** v.15 ,3-4,p.293-317, 1994.

PETERS, K. E.; WAGNER, J. B.; CARPENTER, D. G.; CONRAD, K. T. World Class Devonian potential seen in eastern Madre de Dios basin, **Oil and Gas** v.95, n.7, p.61-65, 1997.

PETERS, K. E.; WAGNER, J. B.; CARPENTER, D. G.; CONRAD, K. T. Eastern Madre de Dios Devonian generated large volume of oil, **Oil and Gas** v.95, n.8, p.84-87, 1997.

RAMOS, V.A., 2003. Tectónica Andina - Andes Bolivianos. Laboratório de Tectônica Andina. Universidad de Buenos Aires. Disponível em: WWW.AVIRJS.GL.FCEN.UBA.AR/TECTONICA_ANDINA. Acesso em: 02 de Janeiro de 2007.

RAVAULT, Patrick; RUSSEL, Simon. 3D *Magneto-tellurics for imaging a Devonian reservoir (Huamampampa) in the southern Sub-Andean basin of Bolivia*. In: SEG International Exposition and 72nd Annual Meeting, 2002, Salt Lake City, Utah.

SCHLUMBERGER, M. *The application of telluric currents to surface prospecting*. **Am. Geophysics Union Trans. Pt. III**, p. 271-277, 1939.

SCOTT, M., 2007. Earth Sciences Division NASA/GSFC Security and Privacy Statement. Disponível em: <HTTP://EARTH OBSERVATORY.NASA.GOV/STUDY/HYDROSHEDS/>. Acesso em: 01 de Maio de 2007.

SUÁREZ-SORUCO, R. *Compendio de Geología de Bolivia - Cap. 5 Llanura Beniense, Cuenca Dei Madre de Dios y Plataforma Beniense*, **Revista Técnica de Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos** v.18, n.1-2, p.101-110, 2000.

TARANTOLA, Albert. *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*. Philadelphia: SIAM - Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005. 342p. ISBN 0-89871-572-5.

TEIXEIRA Wilson (org.), *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p.568.

TORRES, D.C., 2001. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana. Consejo Regional de Administracion Regional de Madre de Dios. Disponível em: <WWW.IIAP.ORG.PE/PUBLICACIONES/CDS/ZONIFICACION/INDEX.HTM>. Acesso em: 01 de Maio de 2007.

VOZOFF, K.; ELLIS, R. M.; BURKE, M. D. *Telluric Currents and their use in the petroleum exploration*. **Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists**, v. 48, pp. 1890-1901, 1964.

VOZOFF, Keeva. *The Magnetotelluric method in the Exploration of Sedimentary Basins*. **Geophysics**, v. 37, pp. 98-141, 1972.

VOZOFF, K. *The Magnetotelluric Method*. In: Nabighian, M. N. (ed); **Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Applications Part B**. Society of Exploration Geophysicists, 1991. Cap 8.