



UFRJ

**Gustavo Catão Alves**

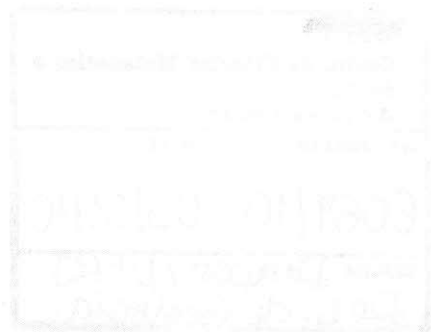
**ESTUDO TEÓRICO DE GRAVIMETRIA NA BACIA MADRE DE DIOS**

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:

Paula Lúcia Ferrucio da Rocha  
Júlio César Soares de Oliveira Lyrio

Rio de Janeiro  
Agosto de 2007



MGL  
A474E

Gustavo, Catão Alves

**Estudo Teórico De Gravimetria Na Bacia Madre De Dios /**

Gustavo Catão Alves - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2007.

xx, 50 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: Paula Lúcia Ferrucio da Rocha, Júlio César Soares de Oliveira Lyrio

1. Geofísica. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Paula Lúcia Ferrucio da Rocha II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. III. Título.

Gustavo Catão Alves

ESTUDO TEÓRICO DE GRAVIMETRIA NA BACIA MADRE DE DIOS

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:

Paula Lúcia Ferrucio da Rocha  
Júlio César Soares de Oliveira Lyrio

Aprovada em: 31 de julho, 2007

Por:



---

Paula Lúcia Ferrucio da Rocha (UFRJ)

---

Júlio César Soares de Oliveira Lyrio (Petrobras)

## Agradecimentos

À Deus, pela minha inteligência e pela saúde para poder gozá-la. À minha família e amigos pelo apoio em todas as decisões de minha vida, sem nunca questionar minhas escolhas. À Petrobras pelos recursos para a realização deste trabalho e por oferecer as condições de aprendizado em minha formação profissional. Aos meus colegas, em especial a Bruno Fidalgo, pela colaboração na execução deste trabalho. E ao Professor Leonardo Borghi, sobretudo pela paciência para ensinar geologia para físicos.



## Resumo

ALVES, Gustavo. **Estudo Teórico de Gravimetria na Bacia Madre de Dios**. 2007. xx, 50p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A bacia Madre de Dios é uma bacia de ante-país ainda pouco estudada e explorada pela indústria petrolífera. O conhecimento mais completo da bacia permitiria uma melhor avaliação do potencial petrolífero da região, criando novas oportunidades de exploração. Entre os primeiros métodos a serem adotados no estudo de uma nova área, a gravimetria se destaca como uma técnica rápida e relativamente barata para o entendimento macroscópico de uma área. Este trabalho se propõe a fazer uma revisão bibliográfica da geologia da bacia Madre de Dios e propor um modelo para o mapa Bouguer da região através da análise de mapas gravimétricos da bacia Marañon, também localizada no Peru, geograficamente próxima e estruturalmente similar à bacia Madre de Dios.

Palavras-chave: petróleo, gravimetria, Bouguer, Peru, Madre de Dios, Marañon.

## Abstract

ALVES, Gustavo. **Estudo Teórico de Gravimetria na Bacia Madre de Dios.** [*Theoretical Gravimetry Study in the Madre de Dios Basin*]. 2007. xx, 50p. 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.

Madre de Dios is a foreland basin that has not been much studied or explored by the oil industry. A deeper understanding of the basin would allow for a better evaluation of the potential for oil and gas generation, creating new exploration opportunities. Amongst the first methods to be employed in the study of a new region, gravimetry stands out as a fast and comparatively cheap technique for the macroscopic understanding of an area. The aim of this work is to make a bibliographical review of the Madre de Dios' basin geology, as well as propose a model for the Bouguer map of the region. This model is based on gravimetric maps of the Marañon basin, also located in Peru, which is geographically near and structurally similar to the Madre de Dios basin.

**Key-Words:** oil, gravimetry, Bouguer, Peru, Madre de Dios, Marañon.

## Lista de figuras

Figura 1 – Mapas de localização da bacia Madre de Dios. (a) IHS, 1995; (b) SCOTT, 2007...	4
Figura 2 – Estratigrafia generalizada da Bacia Madre de Dios na região Peruana, modificada de PETERS (1997a).....	11
Figura 3 – Elementos morfoestruturais do continente Sul-americano ao sofrer subducção da placa de Nazca (RAMOS, 2003). .....	18
Figura 4 – Elementos estruturais referentes à Bacia Madre de Dios com suas principais estruturas em vermelho: arcos de Madidi, Manu e Fitzcarrald (HOUSE, 2000).....	19
Figura 5 – O Arco de Fitzcarrald, que deforma grande parte da bacia Amazônica (BABY, 2005). .....	19
Figura 6 – (a) Mapa da região que compreende a bacia Madre de Dios e arredores, indicando a direção ao longo da qual se desenha a seção mostrada em (b) (BABY, 2005).....	23
Figura 7 – Mapa da região da bacia Madre de Dios com dados de maturação térmica obtida a partir dos valores de reflectância da vitrinita (PETERS, 1997b).....	24
Figura 8 – Oscilações climáticas pleistocênicas e implicações no nível marinho (FAIRBRIDGE, 1961). .....	25
Figura 9 – Sistema petrolífero da Formação Tomachi (PETERS, 1997b).....	26
Figura 10 – Gráfico de índice de hidrogênio versus índice de oxigênio, de acordo com PETERS (1997b). .....	27
Figura 11 - Balança de torção de Eötvos, muito utilizada em estudos de gravimetria no início do século XX (DOMENICO, 1994). .....	31
Figura 12 - Gravímetro de Lacoste e Romberg utilizando a mola de comprimento zero. Estes instrumentos hoje permitem uma precisão de 10 $\mu$ gal. ( <a href="http://geophysics.ou.edu/gravmag/measure/relative.html">http://geophysics.ou.edu/gravmag/measure/relative.html</a> ).....	33
Figura 13 - Ondulação do geóide acima do elipsóide de referência causada pela presença de massa acima da superfície do elipsóide. ....	35
Figura 14 – A presença de montanhas (a) ou vales (b) ao redor de uma estação de medida causa uma diminuição do valor obtido pela correção Bouguer. (Modificado de: <a href="http://pkukmweb.ukm.my/~rahim/gravity%20lecture(MSc).htm">http://pkukmweb.ukm.my/~rahim/gravity%20lecture(MSc).htm</a> ). .....	40
Figura 15 - Mapa morfoestrutural da bacia Marañon com a localização de poços, linhas sísmicas e gravimetria (HERMOZA, 2004). .....	44
Figura 16 - Mapa gravimétrico do gradiente vertical da anomalia Bouguer na bacia Marañon (HERMOZA, 2004). .....	45
Figura 17 - Mapa de gravidade Bouguer da bacia Marañon (RODDAZ, 2005).....	46

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela com as bacias sedimentares do Peru e a relação de seus dados exploratórios para hidrocarboneto (Ministério de Energía y Minas del Perú, 2001).....	5
Tabela 2 – Tabela de prospectos e leads da bacia Madre de Dios no lado peruano (EGÚSQUIZA, 2004).....	8
Tabela 3 – Estratigrafia generalizada da bacia Madre de Dios na região boliviana, modificada de SORUCO (2000).....	10

## Sumário

Agradecimentos.....	vi
Resumo.....	viii
Abstract.....	ix
Lista de figuras.....	x
Lista de tabelas.....	xi
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO .....</b>	<b>2</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>3</b>
<b>4 GEOLOGIA DA BACIA MADRE DE DIOS .....</b>	<b>4</b>
<b>4.1 Contexto Geológico .....</b>	<b>4</b>
4.1.1 ESTRATIGRAFIA .....	9
4.1.1.1 Embasamento.....	11
4.1.1.2 Ordoviciano .....	12
4.1.1.3 Seqüência Siluriano – Carbonífero inferior .....	12
4.1.1.4 Seqüência Permo-Carbonífera .....	14
4.1.1.5 Seqüência Cretácea - Quaternária.....	15
4.1.2 Geologia Estrutural e Evolução Tectônica .....	16
4.1.3 Geologia Histórica .....	21
4.1.4 Geologia do Petróleo .....	26
<b>5 MÉTODO GRAVIMÉTRICO.....</b>	<b>30</b>
<b>5.1 Introdução .....</b>	<b>30</b>
<b>5.2 O Método Gravimétrico .....</b>	<b>33</b>
5.2.1.1 Correção de Latitude.....	36
5.2.1.2 Correção de <i>drift</i> .....	37
5.2.1.3 Correção <i>free-air</i> .....	38
5.2.1.4 Correção Bouguer .....	38
5.2.1.5 Correção de terreno.....	39
5.2.1.6 Correção Eötvös.....	41
5.2.1.7 Correção Isostática.....	42
<b>6 GRAVIMETRIA NA BACIA MARAÑON.....</b>	<b>43</b>
<b>7 CONCLUSÃO .....</b>	<b>48</b>

## 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 grandes descobertas economicamente viáveis para que continuassem os trabalhos na região. Por isso, a bacia Madre de Dios apresenta poucos dados exploratórios pra hidrocarbonetos, e os poucos que tem, sem interesse econômico para a exploração dos mesmos. 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 (trapas) suficientes e um bom sistema de falhas para que o hidrocarboneto seja aprisionado. 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 deste trabalho é realizar um estudo de caso do método gravimétrico aplicado à bacia Madre de Dios, localizada no Peru, através do estudo comparativo de dados de gravimetria da bacia Marañon. Para tal, este trabalho inclui uma revisão bibliográfica sobre a geologia da bacia Madre de Dios e seu potencial petrolífero, assim como uma revisão da teoria envolvida na técnica de gravimetria. As características estruturais principais da bacia Marañon também são descritas e os resultados de anomalia Bouguer desta bacia serão apresentados para se traçar um paralelo entre os resultados da literatura e o modelo proposto.

### 3 METODOLOGIA

As informações utilizadas na descrição geológica da bacia Madre de Dios são resultado de uma revisão bibliográfica sobre o assunto. A técnica de gravimetria, objeto de estudo deste trabalho, foi revisada para melhor compreensão dos processos físicos envolvidos no método a partir de referências amplamente divulgadas na literatura. Não é objetivo desta revisão da técnica um estudo aprofundado do método gravimétrico, que pode ser encontrado em maior detalhe nas referências aqui citadas. Até o momento da finalização deste trabalho, não foi encontrada na literatura qualquer referência à dados gravimétricos pertinente à bacia Madre de Dios. Desta forma, o estudo se baseia em informações e dados de gravimetria referentes à bacia Marañon, também no Peru, encontradas no capítulo “III.2.2 - *La plaine amazonienne ou foredeep depozone: Bassin Marañon*”, da tese de doutorado de HERMOZA (2004) com o título “*Dynamique Tectono-Sedimentaire et Restauration Sequentielle du Retro-Bassin d'avant-pays des Andes Centrales*”, pela Université Paul Sabatier Toulouse III, na França, em Novembro de 2004; e também nas informações de gravimetria do artigo de RODDAZ (2005) sobre a formação do arco de Iquitos, também na bacia Marañon.



## 4 GEOLOGIA DA BACIA MADRE DE DIOS

### 4.1 Contexto Geológico

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). 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.

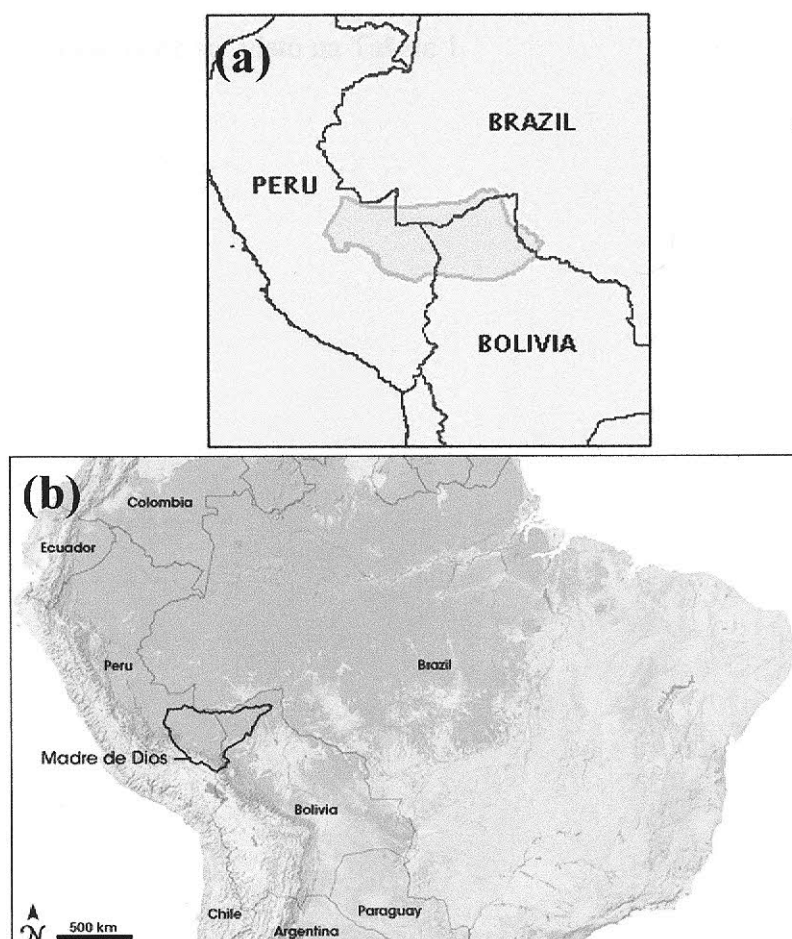


Figura 1 – Mapas de localização da bacia Madre de Dios. (a) IHS, 1995; (b) SCOTT, 2007.

Estende-se por uma área de cerca de 120.000 km<sup>2</sup> segundo MATHALONE (1995), apesar de não haver unanimidade na literatura em relação ao tamanho da bacia, podendo encontrar-se a extensão de 95.000 km<sup>2</sup>, como 170.000 km<sup>2</sup>, 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 YPF, 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 na Tabela 1.

*Tabela 1 – Tabela com as bacias sedimentares do Peru e a relação de seus dados exploratórios para hidrocarboneto (Ministério de Energia y Minas del Perú, 2001).*

**TABLA N° 1  
CUENCAS SEDIMENTARIAS EN EL PERÚ - INFORMACIÓN GENERAL**

N°	CUENCA	AREA (MM-ACRES)	POZOS PERFORADOS	RESERVA SEDIMENTARIO (PIES)	RESERVAS PROBADAS AL 31/12/99			PRODUCCION ACUMULADA PETROLIO (MMBLS)	PRODUCCION PROMEDIO 2000			INFORMACION DISPONIBLE		
					RESERVA SEDIMENTARIA (MMBLS)	PET. (MMBLS)	GAS (BPC)		LGN (MMBLS)	PET. BPD	GAS MPCD		LGN BPD	
1	TUMBS - PROGRESO	1,8	496	19 000	293		182	206	4				Geología de superficie, magnetometría, gravimetría, sismica on mar y tierra, reporte de pozos, estudios ambientales y reportes de producción.	
2	TALARA	4,2	13 409	26 000	1 873		182	206	1 389	32 823	88 709	651	Adiantante información geofísica y geológica, reporte de pozos, estudios ambientales y reportes de producción.	
3	TRUJILLO	4,3	1	11 600	424								Sísmica marina y reporte de un pozo.	
4	LIBA	6,1		6 500	340								Sísmica marina.	
5	MOQUEGUA	6,4	686	12 500	686								Sísmica marina.	
6	LANCONES	1		10 000	85								Geología de superficie, gravimetría y estudios geoquímicos.	
7	SECHURA	7,4	60	11 500	629								Gravimetría, magnetometría, datos geológicos, reporte de pozos, sismica y estudios ambientales.	
8	SALAVERRY	7,9	3	13 000	880								Sísmica marina, reportes de pozos y estudios ambientales.	
9	PISCO	8,2	1	15 000	633								Geología de superficie, aeromagnetometría, sismica, geocronología y reporte de un pozo.	
10	MOQUEGUA	4		10 000	36								Reportes geológicos de entidades gubernamentales.	
11	SANILAGO	4	7	32 000	687								Geología de superficie, gravimetría, fotos aéreas, SLAR, imágenes satelitales, geoquímica, reportes de pozos y estudios ambientales.	
12	BAQUIA	1,3		23 000	190								Geología de superficie y geoquímica.	
13	HUALAGA	7,4	1	26 000	1 383								Geología de superficie, gravimetría, geoquímica, sismica, imágenes de radar, reporte de un pozo y estudios ambientales.	
14	ENE	2,5		13 000	934								Geología de superficie, aeromagnetometría, SLAR, fotos aéreas y geoquímica.	
15	TIICACA	10	33	25 000	1 797								Geología de superficie, aeromagnetometría, sismica, geoquímica, reportes de pozos y estudios ambientales.	
16	MARANON	49,4	406	21 000	5 565		126		827	62 006	12 434		Aeromagnetometría, gravimetría, sismica, sismica de velocidad, SLAR, fotos aéreas, geoquímica, estudios regionalizados, reportes de pozos, estudios ambientales y reportes de producción.	
17	UCAYALI	25,9	137	19 000	10 612		1	8 398	581	25 (1)	504	59 076	3 885	Aeromagnetometría, gravimetría, sismica, fotos aéreas, ambientes y reportes de producción.
18	MAORE DE DIOS	22,2	6	33 000	5 266								Geología de superficie, gravimetría, geoquímica, sismica, paleontología, foto geología, SLAR, fotos aéreas, reportes de pozos y estudios ambientales.	

ABREVIATURAS:  
 LCN -- Litales del Gas Natural  
 MM-ACRES -- Millones de acres  
 BCF -- Billones de pies cúbicos  
 BPD -- Barriles por día  
 MPCD -- Miles de pies cúbicos por día

Notas: (1) Incluye acumulado de LCN del yacimiento de Aguayta.

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, Mississipiano 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).

A Tabela 2 traz dados de prospectos 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).

Tabela 2 – Tabela de prospectos e leads da bacia Madre de Dios no lado peruano (EGÚSQUIZA, 2004).

PROSPECTS AND LEADS		8,729 KM2						
Name	Description & Status	Existing Control	Petroleum System			Spec. TD m.	Por	MOBIL Spec. Reserves MMBOE
			Source Rocks	Seal	Reservoir			
1 CANDAMO SOUTH PROSPECT (PORTION)	Triangle Zone. Anticline 4-way closure. Fault dependent closure. <b>Better strat/struct (updip) than well</b> 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	Ene,Copacabana, Ambo & Cabanillas	Tertiary, Chonta	Cretaceous. Permian absent.	4,000	VG	
3 COLORADO LEAD	Frontal Thrust. Anticline 3-way closure. Unknown strike closure. Oil & gas Favorable.	1 dip line & Landsat	Ene,Copacabana, Ambo & Cabanillas	Tertiary, Chonta & Ene	Cretaceous. Permian Present?	4,000	VG	
4 DALUENE 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	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 MIRADOR LEAD	Frontal Thrust. Anticline 4-way closure. Unknown strike closure. Oil & gas Favorable.	2 dip lines & Landsat	Ene,Copacabana, Ambo & Cabanillas	Tertiary, Chonta & Ene	Cretaceous. Permian Present?	4,000	G	
10 NUSINISCATO LEAD	Hinterland 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 PANTIACOLLA LEAD	Frontal Thrust. Anticline 4-way closure. Leaking oil/gas.	Landsat	Ene,Copacabana, Ambo & Cabanillas	Tertiary, Chonta & Ene	Cretaceous and Permian. Tarma (Green SS) may be in core	3,000	G	220
12 PINI PINI LEAD	Hinterland Thrust.Anticline 3-4 way closure. Unknown strike closure. Gas & Cond Favorable	Landsat & seismic on interpreted S plunge	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 LOROMAYO LEAD (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
<b>TOTAL</b>								<b>11,025</b>



#### 4.1.1 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 (Tabela 3) para a região boliviana. Já a parte peruana da bacia apresenta uma coluna estratigráfica com diferentes nomenclaturas, conforme mostrado na Figura 2. Porém, como não foi encontrada ampla bibliografia nesta região, neste trabalho nos ateremos à descrição do lado boliviano.

Tabela 3 – Estratigrafia generalizada da bacia Madre de Dios na região boliviana, modificada de SORUCO (2000).

CICLO	SISTEMA	FORMAÇÃO	EVENTO TECTÔNICO
ANDINO	Quaternário	Candelária	BACIA DE FORELAND
	Neógeno	Cobija Tutumo 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	

S/I – sem informação



		Group/ Formation	Scale m	Lithology	Tectonic Events			
Quaternary	Tertiary	Upper Red Beds 0-1000 m	9000		Foreland Basin			
		Sandstone 500-1000 m	8000					
	Huayabamba	"Lower Red Beds"	7000					
			6000					
Cretaceous		Yvian	5000			Intracratonic Basin		
		Chonta						
		Oriente						
Permian		Miu	4000				Intracratonic Basin	
		Ene						
		Copacabana						
Carboniferous		Tarma	3000		Intracratonic Basin			
		Ambo 300-1200 m						
Devonian		Cabanillas/ Tomachi 300-1000 m	2000					Intracratonic Basin
Silurian	Ananea	San Gabriel	1000					
Ordovician		Carabaya	0			Intracratonic Basin		
Pre- Cambrian		Basement						

Figura 2 – Estratigrafia generalizada da Bacia Madre de Dios na região Peruana, modificada de PETERS (1997a).

#### 4.1.1.1 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 gnaiss 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.

#### 4.1.1.2 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.

#### 4.1.1.3 Seqüência Siluriano – Carbonífero inferior

Baseando-se em registros sísmicos realizados pelas companhias petrolíferas 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 al.* (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 palinórfos 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 palinórfos 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 al.* (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 seqüência 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.

#### 4.1.1.4 Seqüência Permo-Carbonífera

Este ciclo inicia-se com uma seqüência 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 seqüência 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 Copacapana, 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.

#### 4.1.1.5 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 (SCHLAGINTWEIT *et al.*, 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 al.*, 1960 *apud* SORUCO, 2000) e Flora (PERRY *et al.*, 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 Iñapari 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.

#### 4.1.2 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 tornam 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 ( $5^{\circ}$  a  $10^{\circ}$ ) da placa de Nazca sob a placa Sul-americana, num segmento compreendido entre os paralelos  $2^{\circ}$  e  $15^{\circ}$  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 3 mostra uma seção com as diferentes morfologias citadas acima.

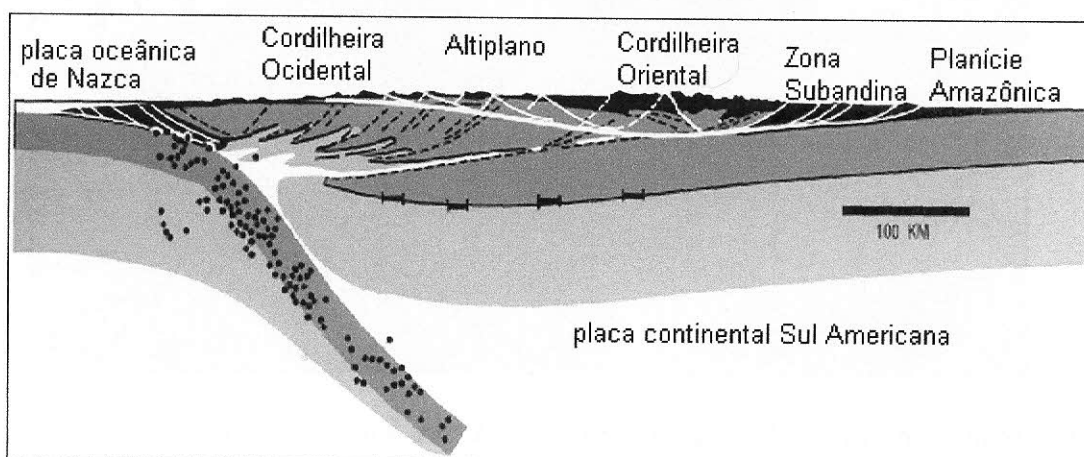


Figura 3 – Elementos morfoestruturais do continente Sul-americano ao sofrer subducção da placa de Nazca (RAMOS, 2003).



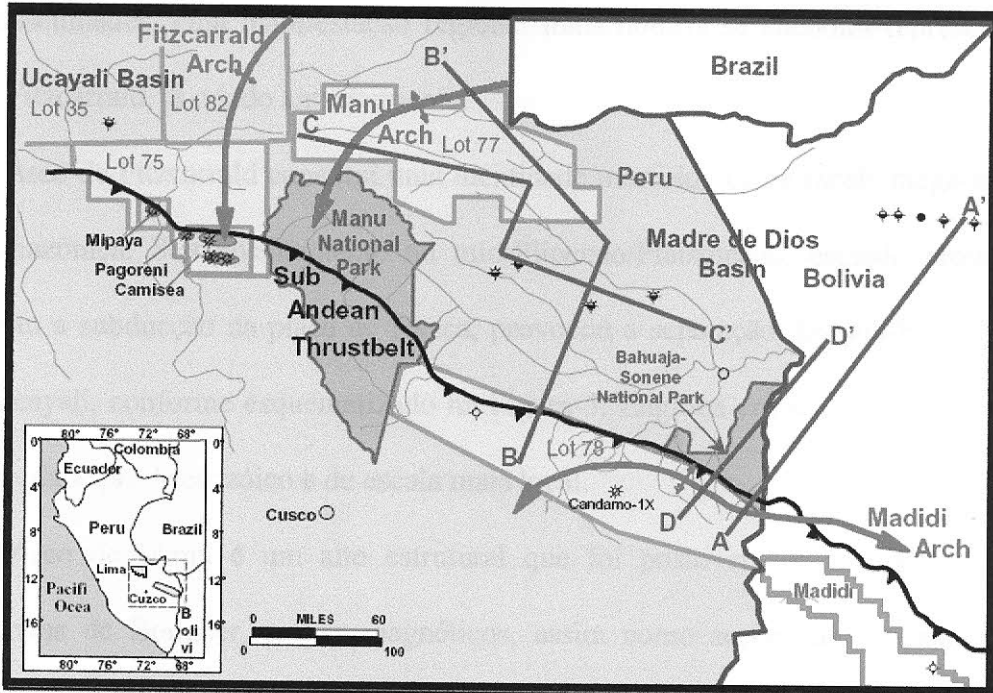


Figura 4 – Elementos estruturais referentes à Bacia Madre de Dios com suas principais estruturas em vermelho: arcos de Madidi, Manu e Fitzcarrald (HOUSE, 2000).

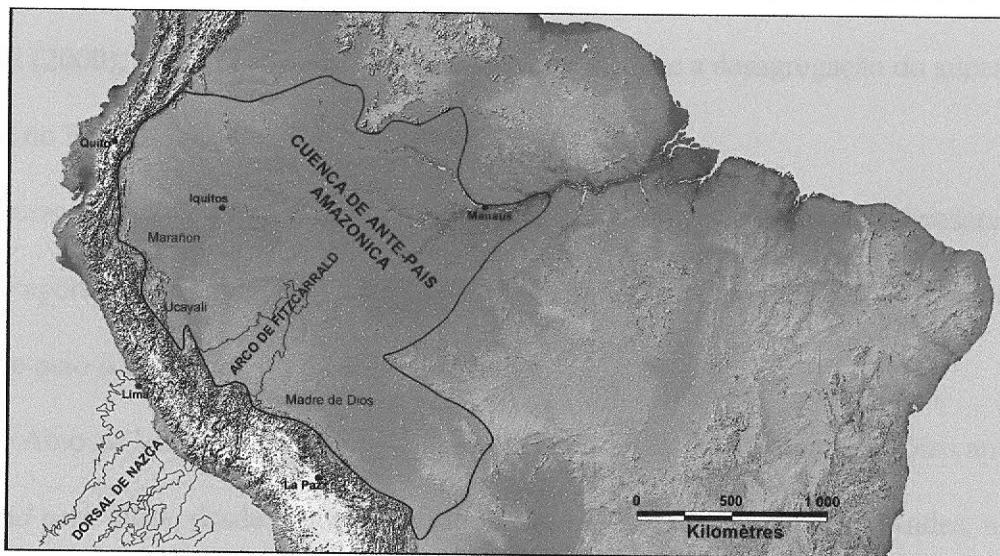


Figura 5 – O Arco de Fitzcarrald, que deforma grande parte da bacia Amazônica (BABY, 2005).

O Permo-Triássico é muito importante pelo início do funcionamento dos Arcos de Fitzcarrald, Manu e Madidi (Figura 4), 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 5. 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 erodido 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 as 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.

#### 4.1.3 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 5. 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 clásticos. 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 deltáicas 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 clásticos, 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 6. Na Figura 6(b) pode-se observar que os horizontes de descolamento situam-se no Permiano Superior, enquanto que os

deslocamentos das camadas se iniciaram por volta de 11 Ma, conforme será comentado mais adiante (BABY, 2005).

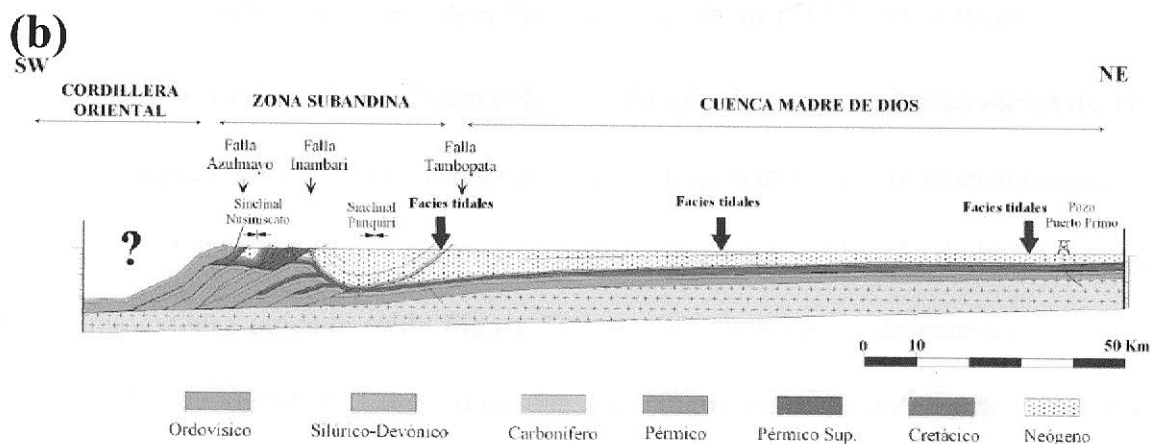
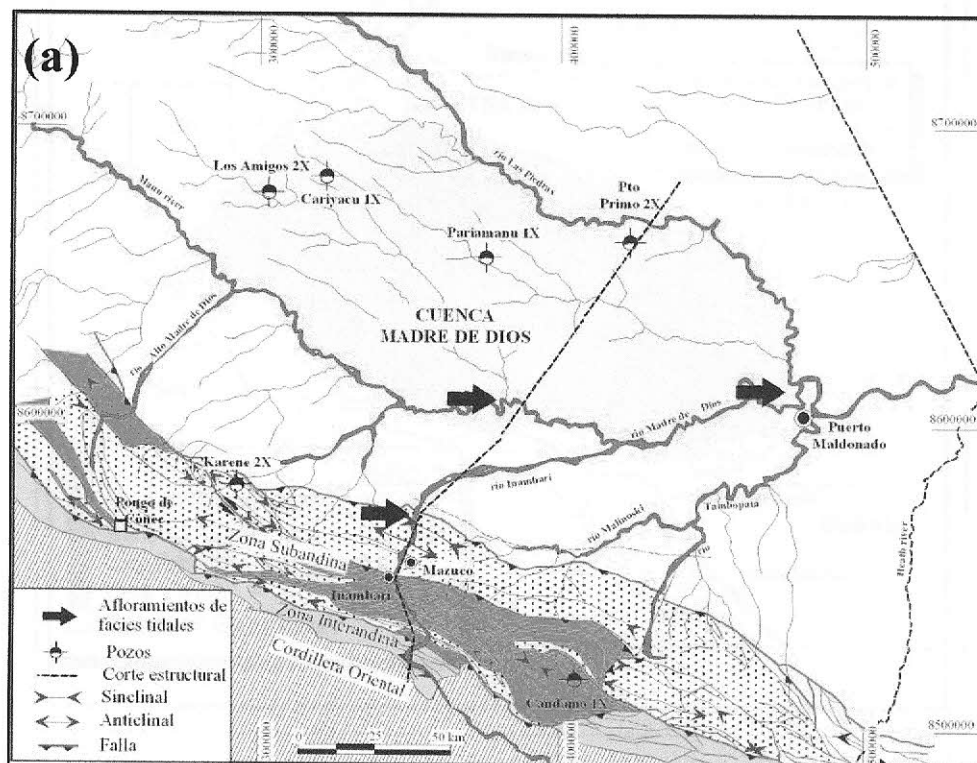


Figura 6 – (a) Mapa da região que compreende a bacia Madre de Dios e arredores, indicando a direção ao longo da qual se desenha a seção mostrada em (b) (BABY, 2005).

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 7 abaixo, que traz as regiões com geradoras classificadas em maduras e imaturas de acordo com os valores de reflectância da vitrinita (PETERS, 1997a).

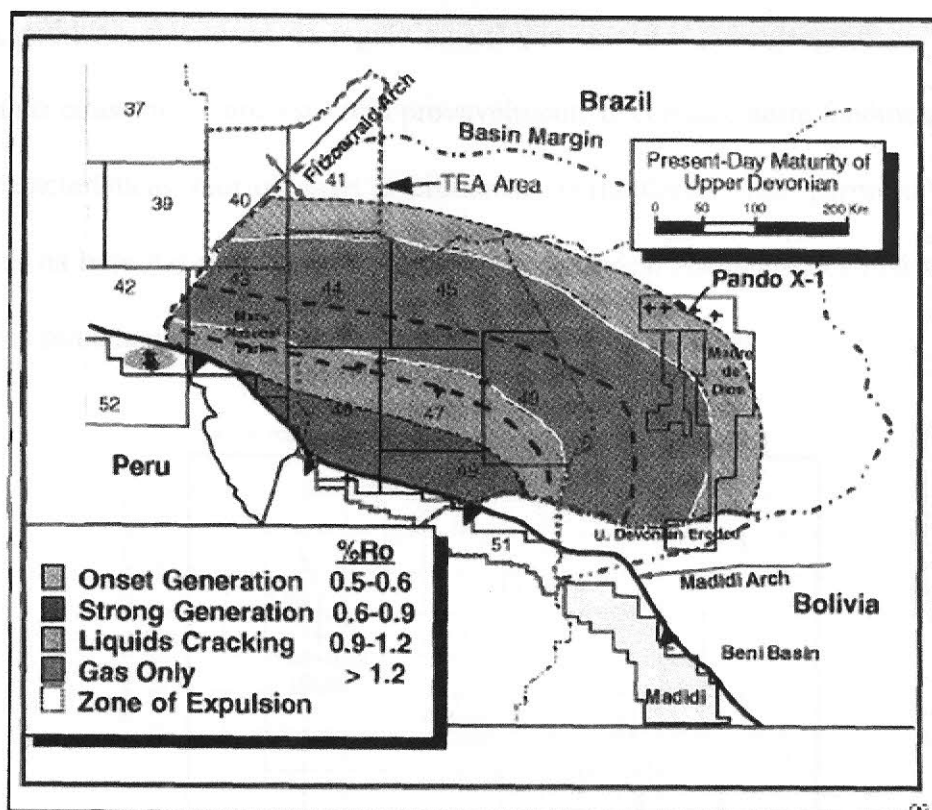


Figura 7 – Mapa da região da bacia Madre de Dios com dados de maturação térmica obtida a partir dos valores de reflectância da vitrinita (PETERS, 1997b).

O Mio-Plioceno é caracterizado pela a 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 5), 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 conseqüência do soergimento do Arco de Fitzcarrald (BABY, 2005).

Oscilações climáticas intensas ocorridas no Pleistoceno influenciaram a região, com subidas e descidas do nível do mar (Figura 8). 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.

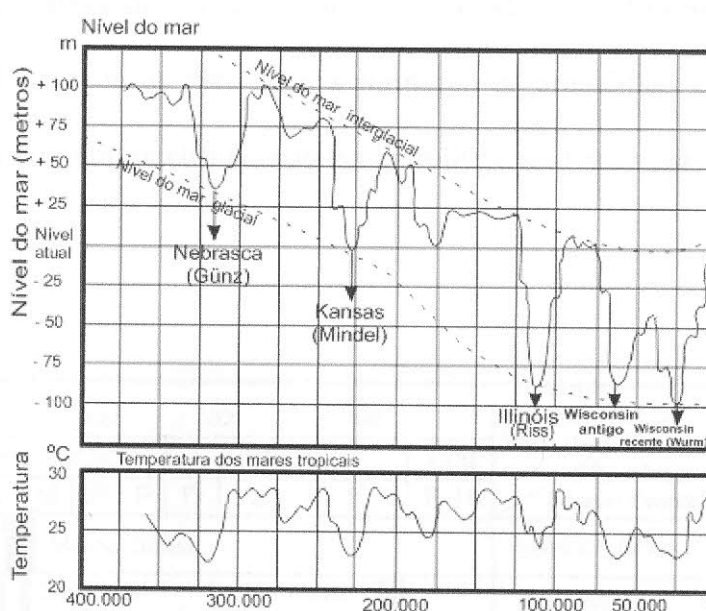


Figura 8 – Oscilações climáticas pleistocênicas e implicações no nível marinho (FAIRBRIDGE, 1961).

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).

#### 4.1.4 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 9 mostra um quadro do sistema petrolífero na Formação Tomachi, do lado peruano.

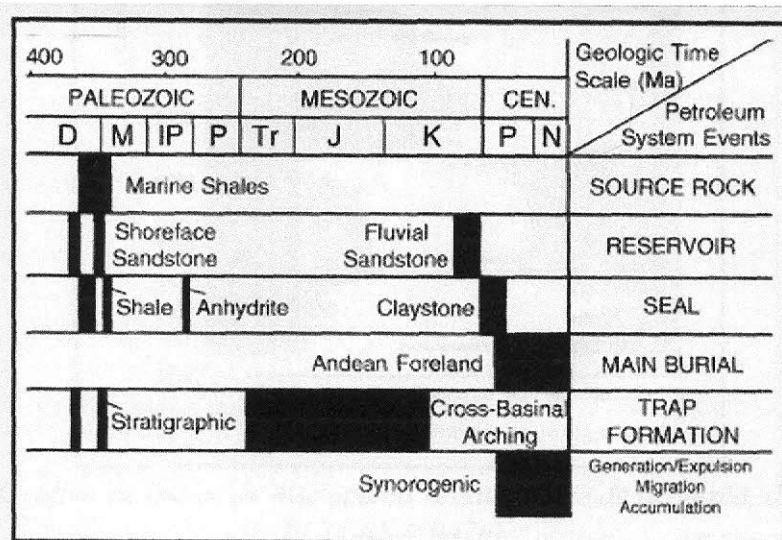


Figura 9 – Sistema petrolífero da Formação Tomachi (PETERS, 1997b).

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 10. No poço boliviano Pando-X1, 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 S<sub>2</sub> médio de 22 a 80 mg HC/g COT. Estes dados qualificam o querogênio presente nestas rochas como Tipo I /Tipo II (MATHALONE, 1995).

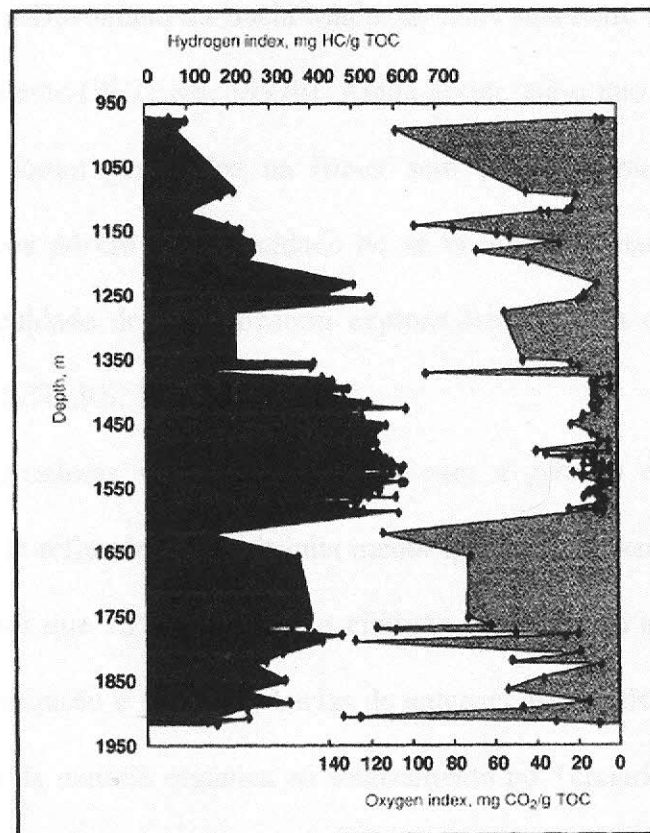


Figura 10 – Gráfico de índice de hidrogênio versus índice de oxigênio, de acordo com PETERS (1997b).

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 7). 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, torna-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 GRAVIMÉTRICO

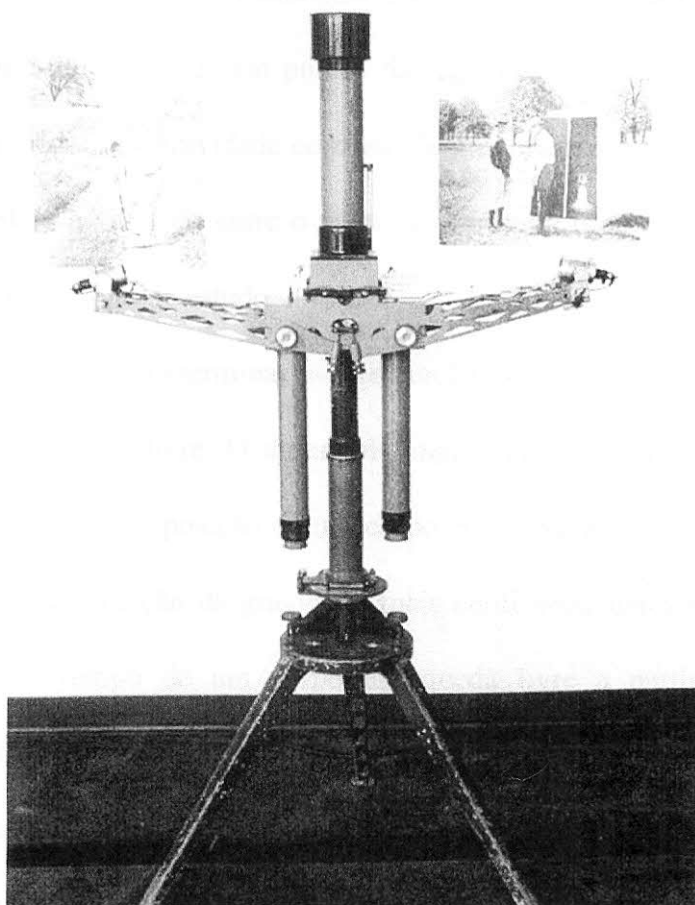
### 5.1 Introdução

Desde o século XVI, quando Galileu propôs as leis de queda livre e do movimento pendular, a gravimetria se desenvolveu como uma forma de estudo da Terra (ECKHARDT, 1940). Formalizadas pelas Leis do Movimento descobertas por Isaac Newton no século XVII, as equações que regem as relações entre as massas dos corpos têm sido objeto de constante estudo, com o conseqüente surgimento de inúmeras técnicas de medidas gravimétricas.

Os primeiros estudos no campo da gravimetria foram estimulados pelo Rei Luís XIV e a Académie Royale des Sciences no final do século XVII e início do século XVIII. Em 1672, o francês Jean Richer percebeu que o tempo medido em um relógio de pêndulo variava com a mudança da latitude. Newton propôs que isto seria devido a variações na gravidade ao longo da superfície da Terra, que poderiam ser explicadas por uma Terra não esférica. Expedições científicas foram enviadas ao círculo Ártico e ao Peru com o objetivo de medir tais variações e comprovar a validade das teorias de Newton. A expedição enviada ao Peru foi liderada por Bouguer, que não só confirmou a forma elipsóide achatada nos pólos do planeta, como também detectou variações gravimétricas em medidas a diferentes altitudes (LOWRIE, 1997).

Durantes os 150 anos seguintes à expedição de Bouguer, todos os estudos gravimétricos foram realizados com o uso de pêndulos. O uso do pêndulo trazia diversas dificuldades, limitando a precisão das medidas, além de ser um instrumento de difícil transporte (ECKHARDT, 1940). Em 1818, Henry Kater inventou o pêndulo composto, melhorando a precisão do pêndulo simples, mas as medidas com estes instrumentos ainda eram muito demoradas (LOWRIE, 1997). Apenas no final do século XIX, com a publicação

dos trabalhos de Eötvös que descreviam a balança de torção, foi possível o desenvolvimento de técnicas mais robustas para a medida de variações gravimétricas. A Figura 11 mostra uma balança de torção de Eötvös como a utilizada no período.



*Figura 11 - Balança de torção de Eötvös, muito utilizada em estudos de gravimetria no início do século XX (DOMENICO, 1994).*

A balança de torção permitiu um uso mais abrangente de técnicas de gravimetria. A medição de variações da gravidade sobre a superfície da Terra se estabeleceu numa técnica eficiente para determinar variações de densidade em subsuperfície associadas a depósitos minerais e, mais tarde, acúmulos de hidrocarbonetos.

Em 1915, o primeiro estudo gravimétrico associado à prospecção de petróleo foi realizado, utilizando a balança de torção de Eötvös. Ao longo de 1915 e 1916, Fekkert e Pekar mediram 100 estações sobre o campo de Eggbell, na Tchecoslováquia. O estudo foi seguido do primeiro mapeamento gravimétrico de um domo de sal, perto de Hanover, no norte da

Alemanha. Em 1923 já havia estudos de gravimetria em campos petrolíferos do Texas, nos Estados Unidos (ECKHARDT, 1940).

O método gravimétrico se baseia no uso de dois tipos de gravímetros: absolutos e relativos. Gravímetros absolutos são equipamentos mais robustos, utilizados para medir com precisão o valor absoluto da gravidade em pontos da região estudada definidos como base. Entre as bases é feita a medida da gravidade com uso de gravímetros relativos, equipamentos mais portáteis, que medem a variação entre o valor calibrado na base e o valor medido nas várias estações ao longo da região de estudo.

Métodos modernos para determinar a aceleração da gravidade são baseados no movimento de corpos em queda livre. O desenvolvimento do interferômetro de Michelson tornou a determinação do tempo e posição de um corpo em movimento muito mais acurada, fazendo os instrumentos de medição da gravidade mais confiáveis. Estes instrumentos, que essencialmente medem o tempo de um corpo em queda livre a partir do repouso ou arremessado na direção contrária à gravidade, são hoje utilizados para determinar o valor absoluto da gravidade em bases de calibração. A partir destes pontos de referência, utilizam-se gravímetros, que medem a variação relativa da gravidade entre a base e a estação de medida. Como os gravímetros devem ser compactos e de fácil operação, estes se baseiam em um sistema massa-mola derivado da Lei de Hooke. LaCoste e Romberg refinaram o conceito deste equipamento com a introdução da mola “de comprimento zero”, hoje um elemento comum nos aparelhos (LOWRIE, 1997). Um diagrama do sistema do gravímetro relativo de Lacoste e Romberg pode ser visto na Figura 12.

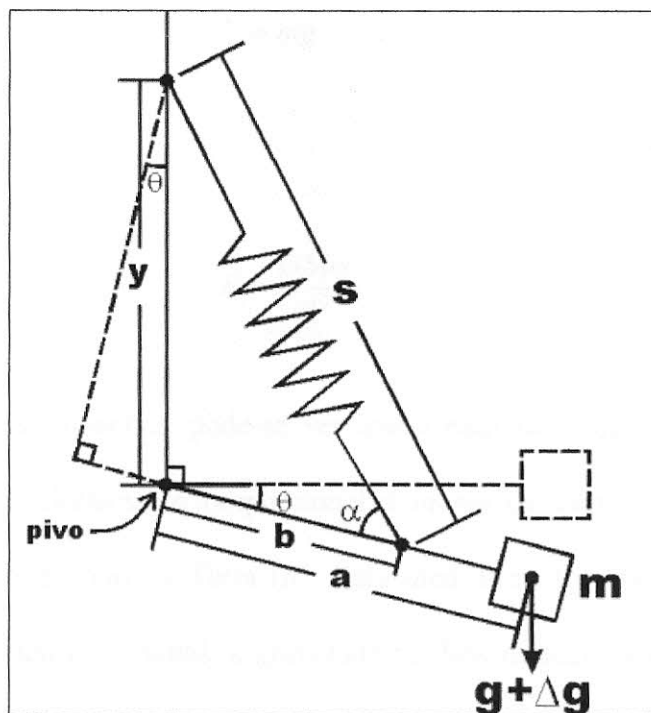


Figura 12 - Gravímetro de Lacoste e Romberg utilizando a mola de comprimento zero. Estes instrumentos hoje permitem uma precisão de  $10 \mu\text{gal}$ .  
 (<http://geophysics.ou.edu/gravmag/measurement/relative.html>)

## 5.2 O Método Gravimétrico

A medida da gravidade como ferramenta de estudo da subsuperfície se baseia nas leis do movimento e na lei universal da gravitação propostas por Sir Isaac Newton em 1687, em seu livro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. A segunda lei do movimento proposta por Newton diz que a resultante das forças que agem sobre um corpo é igual à massa deste corpo multiplicada pela aceleração sofrida por ele. Já sua lei universal da gravitação define a atração entre dois corpos de massa conhecida como diretamente proporcional ao produto das duas massas e inversamente proporcional à distância entre seus centros de massa (REYNOLDS, 1997). As Equações 1 e 2 expressam a segunda lei de Newton e a lei da gravitação, respectivamente:



$$F = mg \quad (\text{Eq. 1})$$

$$F = \frac{GMm}{R^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

Combinando as duas equações, pode-se ver que a magnitude da aceleração devido à gravidade na Terra ( $g$ ) é diretamente proporcional à massa da Terra ( $M$ ) e inversamente proporcional ao quadrado do raio da Terra ( $R$ ). Para uma Terra totalmente esférica e com distribuição de massa simétrica e radial, a gravidade medida na superfície da Terra deveria então ser uma constante. A forma elíptica da Terra, que pode ser aproximada matematicamente de um elipsóide de revolução (REYNOLDS, 1997), sua superfície irregular e variações na distribuição de massa em subsuperfície fazem com que o valor medido para a gravidade na superfície da Terra seja variável. A forma elipsoidal da Terra aceita atualmente é definida pelo Elipsóide de Referência Internacional, calculado com base em medidas das órbitas de satélites artificiais em torno do planeta. O primeiro elipsóide de referência foi calculado em 1930, com correções sendo feitas em 1980 pela comunidade científica (LOWRIE, 1997).

Enquanto o elipsóide é apenas uma aproximação matemática da superfície equipotencial da gravidade na Terra, a superfície equipotencial da gravidade que realmente reflete a distribuição de massa no interior do planeta é dada pelo geóide (TURCOTTE, \*\*\*). Longe das massas continentais, o geóide se aproxima da superfície dos oceanos, ignorando variações de maré e ventos. Sobre os continentes o geóide é afetado pelas massas ~~de terra~~ acima do nível do mar, elevando o geóide em relação ao elipsóide onde existirem massas (montanhas, etc.) acima da superfície do elipsóide. A variação entre as duas superfícies é chamada de ondulação do geóide (LOWRIE, 1997). A relação entre as superfícies é vista na Figura 13.

Terra, não  
de ser  
rocha, todos  
mas terra etc.

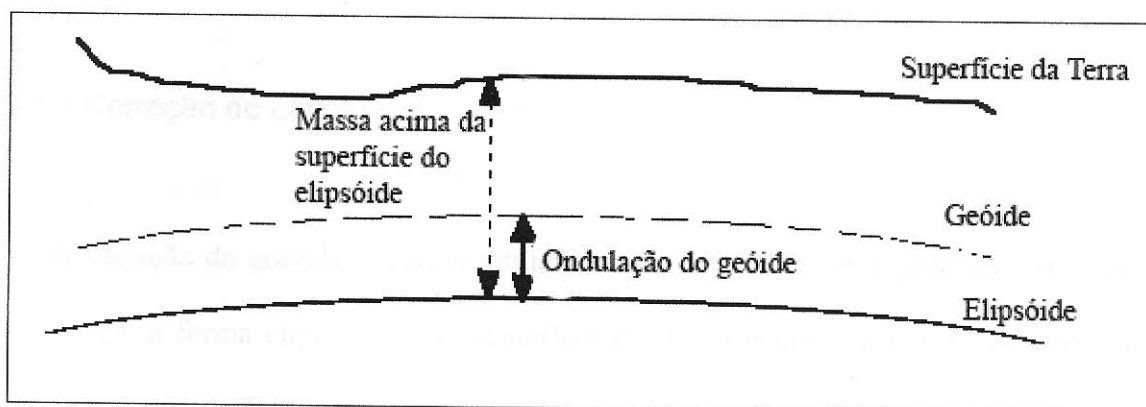


Figura 13 - Ondulação do geóide acima do elipsóide de referência causada pela presença de massa acima da superfície do elipsóide.

A unidade utilizada na gravimetria é o Gal, nome dado em homenagem a Galileu Galilei. O Gal é uma medida de aceleração e corresponde a  $1 \text{ cm/s}^2$ . A precisão dos gravímetros modernos permite medidas da ordem do  $\mu\text{Gal}$ , fazendo com que subunidades como esta e o  $\text{mGal}$  sejam usadas rotineiramente.

O objetivo final de uma aquisição de dados gravimétricos é um mapa de anomalia Bouguer, que deve apresentar apenas o efeito de variações laterais na densidade da subsuperfície associadas a corpos de densidade maior ou menor que a rocha onde estão inseridos. A anomalia Bouguer será então a diferença entre a gravidade observada na estação e a gravidade medida na base, somadas todas as correções necessárias (REYNOLDS, 1997). Essas correções levam em conta fatores como latitude, altitude, variações topográficas na região da aquisição, o efeito Eötvös, entre outras. Assim, um corpo de densidade mais alto que seu meio deve resultar em uma anomalia Bouguer positiva, enquanto um corpo de densidade menor que o meio deve resultar em uma anomalia Bouguer negativa.

## 5.2.1 CORREÇÕES

### 5.2.1.1 Correção de Latitude

A variação da gravidade com a latitude na superfície da Terra pode ser explicada por dois fatores: a forma elíptica de sua superfície e a força centrífuga gerada pela rotação do planeta. A forma da Terra causa variações da gravidade para diferentes latitudes na superfície do planeta, pois o raio da Terra nos pólos é 21 km mais curto que o raio da Terra no Equador (6378 km). Esse valor menor de  $R$  na Equação 2 causa um aumento de cerca de 0,7% para a gravidade medida nos pólos em relação ao valor medido no equador (REYNOLDS, 1997). A rotação da Terra em torno de seu eixo adiciona uma componente centrífuga à aceleração, que tem valor máximo no equador, onde a velocidade rotacional é máxima, e é nula nos pólos. A componente da aceleração centrífuga então gera uma diminuição da gravidade medida no equador se comparada ao valor esperado para um planeta sem velocidade rotacional.

A combinação desses dois fatores permite o cálculo do valor da gravidade em função da latitude ( $\lambda$ ), de acordo com a fórmula da gravidade normal (Equação 3).

$$g_n = g_e \left( 1 + \beta_1 \text{sen}^2 \lambda + \beta_2 \text{sen}^4 \lambda \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\beta_1 = \frac{5}{2} m - f + \frac{15}{4} m^2 - \frac{17}{14} fm$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2} f^2 - \frac{5}{8} fm$$

onde  $m$  é a razão entre a aceleração centrífuga no equador e a gravidade equatorial, e  $f$  é o achatamento do esferóide.

A gravidade normal ( $g_n$ ) é dada em função da gravidade no equador ( $g_e$ ) e das constantes  $\beta_1$  e  $\beta_2$ . Como  $\beta_2$  é  $10^3$  vezes menor que  $\beta_1$ , costuma-se abandonar o último termo, obtendo assim um valor aproximado para  $g_n$ . Para a gravidade no pólo ( $\lambda = 90^\circ$ ) e tomando apenas os termos de primeira ordem em  $\beta_1$ , obtém-se então a expressão descrita pela Equação 4, conhecida como teorema de Clairaut (LOWRIE, 1997).

$$\frac{g_p - g_e}{g_e} = \frac{5}{2}m - f \quad (\text{Eq.4})$$

Com esta relação chega-se a uma aceleração no pólo de  $g_p = 983,2177$  Gal, ou seja, um aumento em relação a  $g_e$  de 5186 mGal.

#### 5.2.1.2 Correção de *drift*

As leituras realizadas em um gravímetro ao longo do dia sofrem alterações devido à distensão da mola contida no aparelho, resultando num aparente aumento da gravidade (TELFORD, 1990). Combinada a este efeito instrumental, a maré causada pela atração gravitacional exercida pela Lua e pelo Sol também causa uma variação nas medidas ao longo do dia. Estes dois efeitos combinados são conhecidos como *drift*, que é corrigido usualmente se tomando novas medidas em estações repetidas ao longo do dia, com intervalos de poucas horas. O aumento na gravidade em uma mesma estação é usado então para se construir uma curva de *drift*, que depois é removida dos dados. Alguns equipamentos mais modernos apresentam *drift* muito pequeno. A correção do efeito de maré pode ser feita alternativamente utilizando tabelas de maré internacionais, publicadas periodicamente (REYNOLDS, 1997).

### 5.2.1.3 Correção *free-air*

Esta correção se baseia na redução da gravidade observada para medidas em altitudes acima do geóide. A correção *free-air* independe do tipo de rocha que se encontra entre o ponto de medida e a superfície do geóide, supondo esse espaço vazio (por isso o nome *free-air*, ou seja, ar livre). A correção *free-air* é a diferença entre a gravidade medida em um *datum* ou superfície de referência (como o geóide, por exemplo) e a uma altitude  $h$  acima deste, resultando assim numa correção positiva para altitudes positivas e negativa para altitudes negativas (REYNOLDS, 1997). Esta correção é de especial importância na aquisição de dados gravimétricos aéreos, em que a altitude em que são realizadas as medidas deve ser levada em consideração. Dada a precisão dos gravímetros atuais, cerca de 0,01 mGal, deve-se conhecer a posição das estações de medida com uma precisão horizontal de 13 metros na superfície e de 3 cm na altitude para que a correção *free-air* seja feita corretamente (TELFORD, 1990).

### 5.2.1.4 Correção Bouguer

Enquanto na correção *free-air* a altitude entre a estação e o geóide é corrigida considerando a ausência de massa entre estes pontos, a correção Bouguer inclui a atração gravitacional exercida pelo material existente entre as duas altitudes (TELFORD, 1990). Supondo que uma estação se encontre exatamente acima de um ponto no geóide e que entre os dois exista uma camada lateralmente infinita e de densidade uniforme, o efeito gravitacional deste excesso de massa causa um aumento no valor medido de acordo com a Equação 5.

$$\frac{\Delta g_B}{\Delta R} = 0,04192 \rho \frac{mGal}{m} \quad (\text{Eq.5})$$

onde  $\rho$  é a densidade da rocha entre a estação e o geóide.

A correção Bouguer então deve ser subtraída dos valores medidos para estações acima do *datum* e adicionada para estações em subsuperfície abaixo do *datum*. No caso de medidas subterrâneas também é importante se considerar a presença de maquinário e a distribuição de túneis, no caso de minas. Esta correção é muitas vezes chamada de correção de galeria (REYNOLDS, 1997).

Pode-se observar na Equação 5 que a determinação da correção Bouguer depende de uma correta estimativa da densidade da rocha entre o *datum* e a estação. A densidade utilizada pode ser escolhida através de medidas de campo, com coleta e análise de amostras de superfície e de testemunhos de poços, quando disponíveis (REYNOLDS, 1997). Um método para estimar a validade de uma escolha de densidade foi proposto por Nettleton e se baseia na correlação entre os dados de topografia e o valor Bouguer corrigido da gravidade nas estações. Como efeitos de topografia não devem mais estar presentes na gravidade corrigida, aquela superfície Bouguer que mostra a menor correlação com a topografia é escolhida como a correta (REYNOLDS, 1997).

#### 5.2.1.5 Correção de terreno

Para se realizar a correção Bouguer, assumiu-se que entre a estação e o *datum* existe uma camada uniforme de rocha de dimensão lateral infinita. Como esta aproximação não reflete corretamente a realidade, a correção de terreno considera as irregularidades na topografia ao redor da estação de medida gravimétrica (TELFORD, 1990). Por exemplo, uma medida gravimétrica realizada ao lado de uma montanha terá um valor menor que o esperado

devido à atração gravitacional do centro de massa dessa montanha, que se encontra mais alto que a estação. Da mesma forma, a presença de um vale próximo à estação representa uma ausência de massa que também causa uma diminuição na gravidade quando comparado a aquela obtida pela correção Bouguer. E, ambos os casos, a correção de terreno é então somada à correção Bouguer, como pode ser visto na Figura 14.

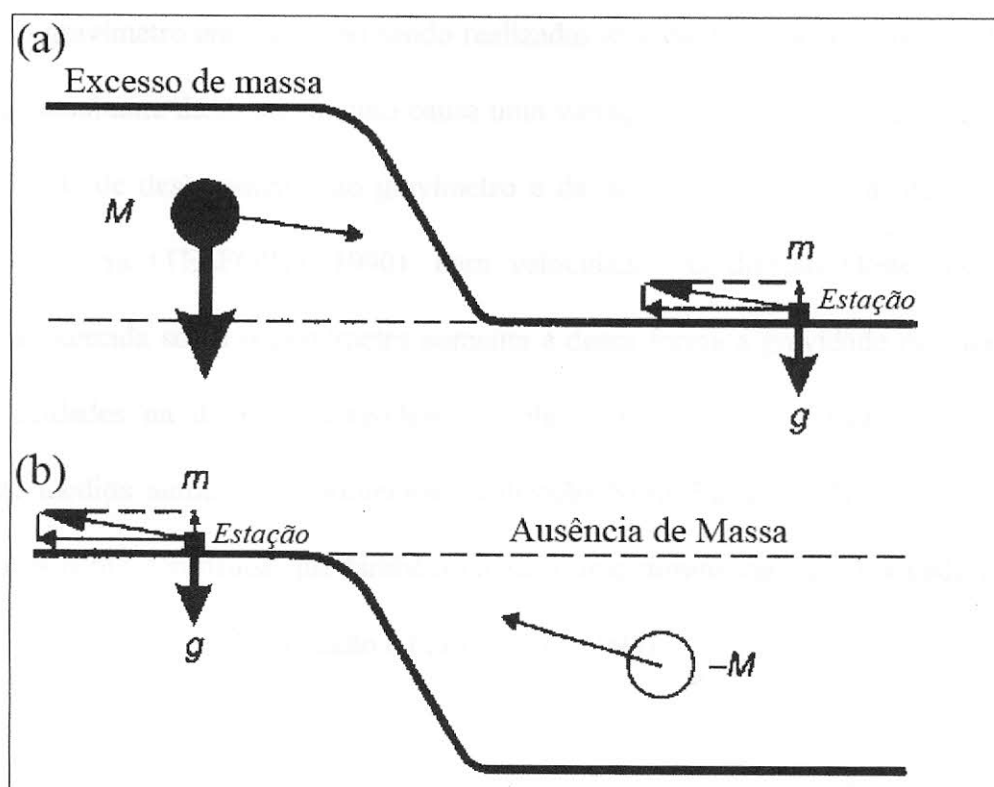


Figura 14 – A presença de montanhas (a) ou vales (b) ao redor de uma estação de medida causa uma diminuição do valor obtido pela correção Bouguer. (Modificado de: [http://pkukmweb.ukm.my/~rahim/gravity%20lecture\(MSc\).htm](http://pkukmweb.ukm.my/~rahim/gravity%20lecture(MSc).htm)).

O método mais conhecido para se estimar a correção de terreno utiliza diagramas de Hammer, que basicamente são círculos concêntricos divididos em setores em uma folha transparente colocada sobre um mapa topográfico ao redor da estação. A variação na topografia para cada setor dos círculos é calculada de acordo com uma tabela específica e sua influência na medida é atribuída por uma média ponderada (REYNOLDS, 1997). Este processo deve ser feito para cada estação, tornando a correção de terreno pelo método de Hammer extremamente laborioso e demorado.



Atualmente, a correção de terreno é feita rapidamente por métodos computacionais, abandonando o uso manual do diagrama de Hammer.

### 5.2.1.6 Correção Eötvös

Se o gravímetro em que estão sendo realizadas as medidas está em movimento, a força centrífuga resultante deste movimento causa uma variação na gravidade medida que depende da velocidade de deslocamento do gravímetro e da direção deste movimento em relação à rotação da Terra (TELFORD, 1990). Para velocidades na direção Oeste-Leste, a força centrífuga exercida sobre o gravímetro aumenta e dessa forma a gravidade medida é menor. Para velocidades na direção Leste-Oeste, o efeito da força centrífuga é diminuído e a gravidade medida aumenta. Movimentos na direção Norte-Sul e Sul-Norte adicionam uma nova componente centrífuga que também causará uma diminuição da gravidade medida. A correção Eötvös é dada pela Equação 6 (TELFORD, 1990).

$$\Delta g_v = 4,040V \cos \varphi \sin \alpha + 0,001211V^2 \text{ mGal} \quad (\text{Eq.6})$$

*onde V é a velocidade medida em Km/h,  $\varphi$  é a latitude e  $\alpha$  é a direção relativa ao norte verdadeiro.*

Pela Equação 6 pode-se perceber que a correção Eötvös é mais sensível à precisão da velocidade em aquisições Leste-Oeste, enquanto aquisições Norte-Sul são mais afetadas pela precisão da direção do movimento (REYNOLDS, 1997).

### 5.2.1.7 Correção Isostática

Em alguns casos, também se faz necessário o uso da correção isostática, que considera o efeito regional de variações laterais de densidade na crosta terrestre. Duas hipóteses são aceitas atualmente para explicar esta variação. O modelo de Airy, de 1855, supõe que a crosta terrestre tem densidade uniforme, porém é mais espessa sob montanhas e mais fina onde o relevo é mais baixo, como sob os oceanos. O modelo de Pratt, de 1859, considera que a base da crosta é uniforme sob o continente e os oceanos, porém a densidade dessa crosta varia inversamente com a altura da topografia da região (REYNOLDS, 1997). As duas hipóteses ainda são aceitas atualmente e a escolha de um dos dois modelos é feita dependendo do modelo geológico a ser construído.

## 6 GRAVIMETRIA NA BACIA MARAÑON

O estudo de caso realizado neste trabalho foi baseado na análise de mapas de anomalia Bouguer da região da bacia de Marañon, localizada no norte do território peruano. A escolha deste estudo baseou-se principalmente em encontrar trabalhos relacionados ao método gravimétrico na bacia Madre de Dios, foco principal desta monografia. Porém, até a publicação da mesma, nenhuma bibliografia com informações de gravimetria da bacia Madre de Dios havia sido encontrada, limitando o estudo a resultados relacionados. A escolha da bacia do Marañon foi motivada por se encontrar geograficamente próxima à bacia de Madre de Dios e por ambas apresentarem uma evolução geológica e elementos estruturais bastante similares. A literatura utilizada foi a tese de HERMOZA (2004) e também o artigo de RODDAZ (2005).

A bacia Marañon faz parte de um sistema de bacias de ante-país, localizando-se a noroeste na bacia amazônica. Ela é deformada localmente por inversões tectônicas de grabens pré-orogênicos do Paleozóico e do Mesozóico. O preenchimento sedimentar da bacia apresenta uma importante série de seqüências de sedimentação neogênicas que diminuem progressivamente na direção sudeste, com sedimentos associados a paleoambientes continentais e marinhos rasos (HERMOZA, 2004).

Como pode ser visto pela Figura 15, a bacia Marañon foi extensamente estudada, através de perfis sísmicos 2D, mapas gravimétricos e diversos poços. O foco aqui são os dados fornecidos pelas informações gravimétricas da região, que podem ser observadas na Figura 16, que traz o mapa de anomalias Bouguer da bacia.

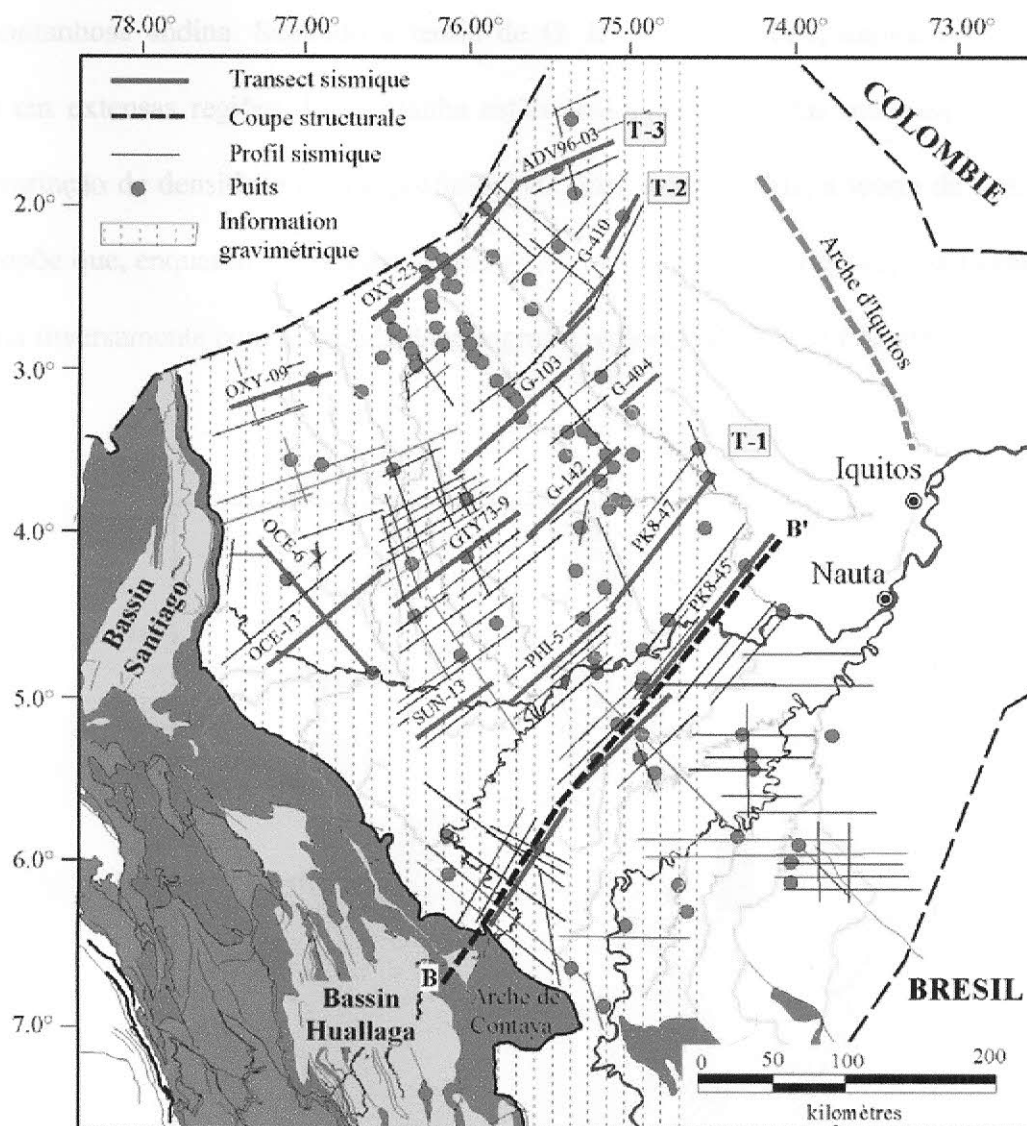


Figura 15 - Mapa morfoestrutural da bacia Marañon com a localização de poços, linhas sísmicas e gravimetria (HERMOZA, 2004).

De acordo com o mapa gravimétrico da Figura 16, que mostra o gradiente vertical de anomalia Bouguer, a região central da bacia Marañon apresenta os valores mais negativos, associados a uma camada sedimentar mais profunda que em outras regiões, com anomalias entre -50 a -100 mGal. A presença do arco de Iquitos, no limite oriental da bacia, e do arco de Contaya, na região sul, corresponde a anomalias positivas que variam entre -10 mGal e 30 mGal (HERMOZA, 2004). A maior sedimentação da bacia na região central é refletida em gradientes verticais mais negativos, abaixo de -50 mGal. Os valores mais negativos encontrados ao longo do limite oeste da bacia (< -100 mGal) podem ser associados à longa

cadeia montanhosa andina. Segundo a teoria de G. B. Airy, de 1855, anomalias Bouguer negativas em extensas regiões de montanha estão associadas a crostas mais espessas e de pequena variação de densidade com a profundidade. Em contrapartida, a teoria de J.H. Pratt (1859) propõe que, enquanto a espessura da crosta apresenta poucas variações, a densidade da crosta varia inversamente com a altitude da topografia regional (REYNOLDS, 1997).

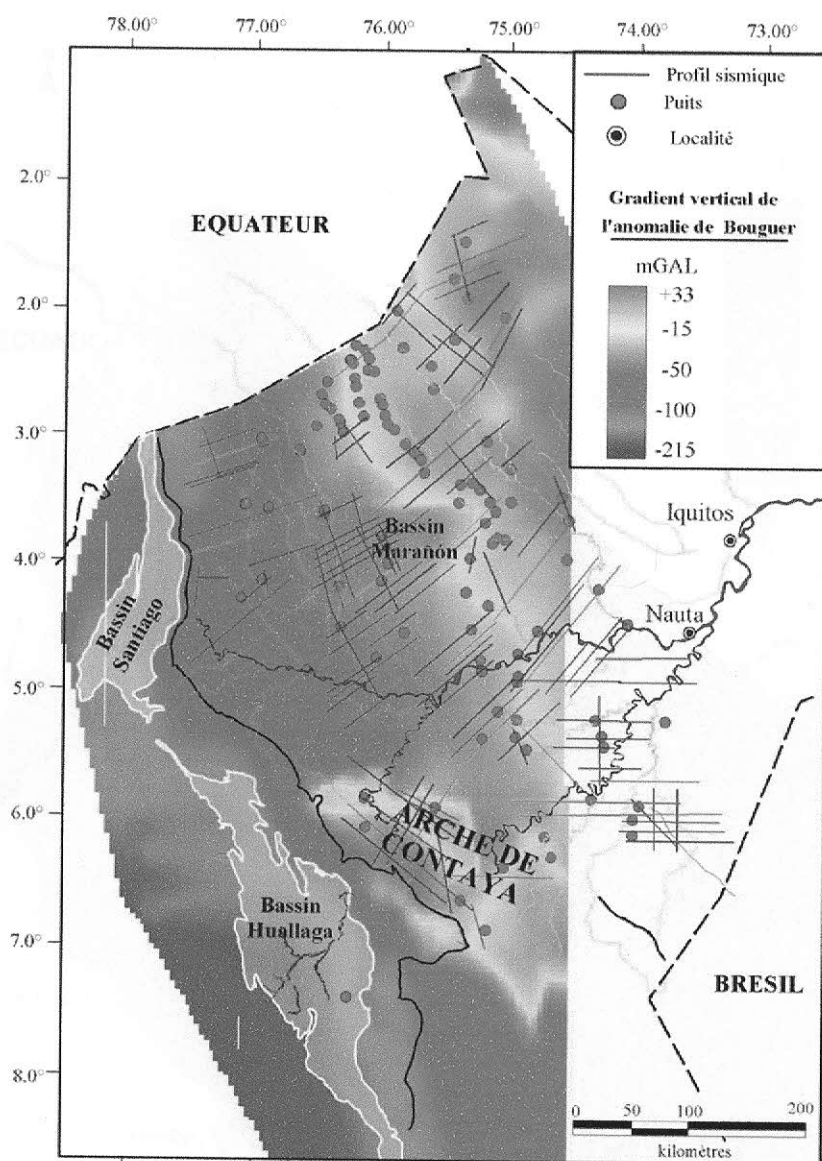


Figura 16 - Mapa gravimétrico do gradiente vertical da anomalia Bouguer na bacia Marañon (HERMOZA, 2004).

De acordo com o mapa de gravidade Bouguer da bacia Marañon, visto na Figura 17, a faixa estreita de anomalias positivas ao longo do limite nordeste da bacia corresponde à

presença do arco de Iquitos. Nesta região, a cobertura sedimentar é mais fina, não atingindo 1 km de espessura, e o embasamento corresponde ao escudo da Guiana, com anomalias Bouguer de cerca de 30 mGals. Aumentos nas anomalias Bouguer ao longo do arco (60 mGals) são atribuídos a variações mineralógicas e petrográficas no escudo da Guiana, como a presença de material máfico pertencente ao Arqueano e Proterozóico (RODDAZ, 2005).

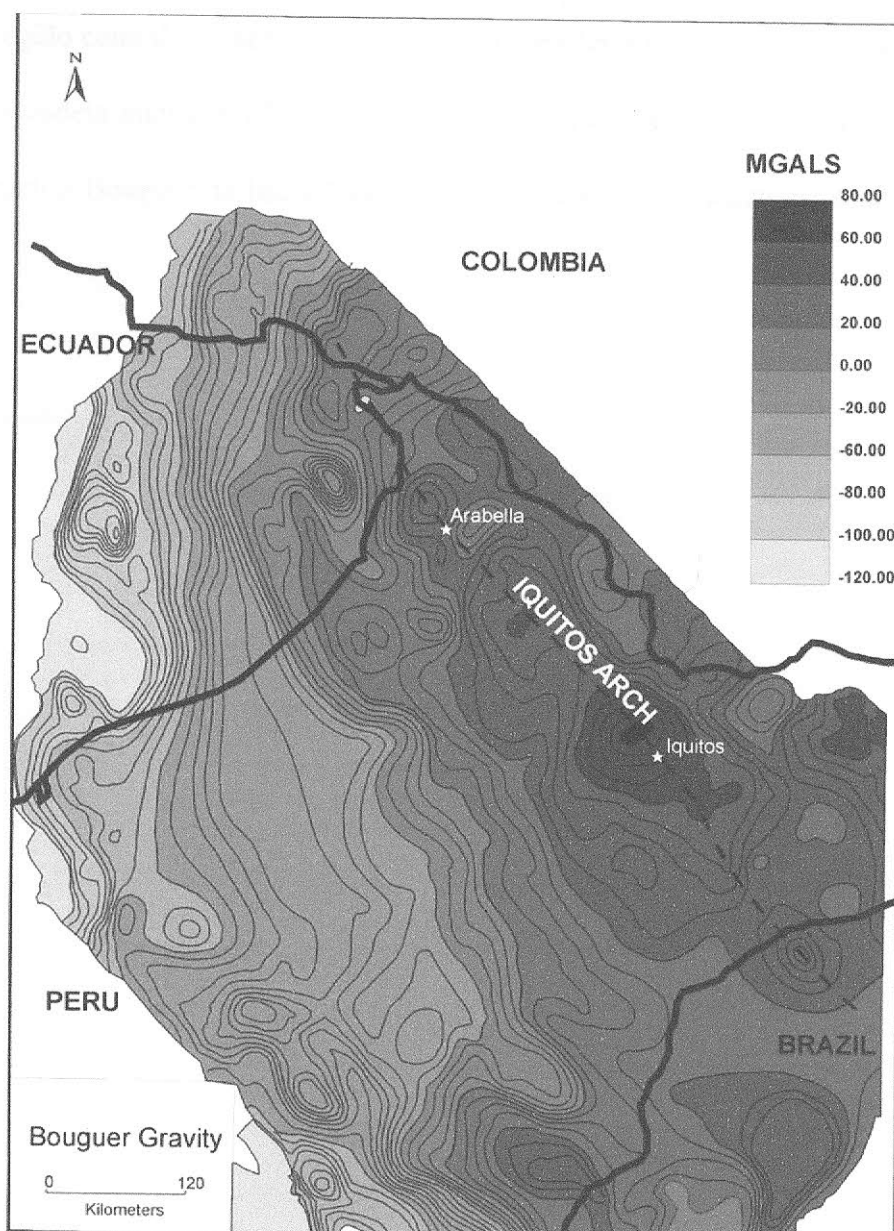


Figura 17 - Mapa de gravidade Bouguer da bacia Marañon (RODDAZ, 2005).

A partir dos mapas de anomalia Bouguer para a bacia Marañon, podemos estender os resultados para uma análise teórica da bacia Madre de Dios. Como pode ser visto na Figura 6, a bacia Madre de Dios é limitada ao sul e ao norte pelos arcos de Fitzcarald e Madidi, o que poderia ser associado a anomalias positivas em um mapa de gravidade Bouguer. Da mesma forma, a bacia Madre de Dios apresenta um espessamento da camada sedimentar na direção nordeste-sudoeste, que refletiria em anomalias Bouguer negativas, comparadas com aquelas percebidas na região central da bacia Marañon. Outra característica comum a ambas as bacias é a presença da cadeia andina no limite oeste da bacia, que corresponderá também em um mapa de gravimetria Bouguer da bacia Madre de Dios a anomalias negativas abaixo de -100 mGal.



## 7 CONCLUSÃO

A falta de bibliografia sobre o método gravimétrico na bacia Madre de Dios está associada ao pequeno interesse petrolífero na região, fato este justificado pela geologia descrita no Capítulo 3 deste trabalho, que mostra uma ausência de estruturas geológicas (armadilhas e falhas) necessárias para se considerar um sistema petrolífero de interesse comercial. Apesar de alguns autores considerarem a possibilidade da bacia como uma região produtora de petróleo, a região, que é remota e de difícil acesso, ainda necessita de maiores estudos.

Em contrapartida, a bacia Madre de Dios apresenta características comuns a outras bacias de ante-país a leste dos Andes, fato que permite criar um modelo gravimétrico para a região. Este modelo, estimado a partir da análise comparativa da bacia Marañon, apresenta resultados associados à presença de arcos e também ao espessamento da camada sedimentar na direção nordeste-sudoeste da bacia.

Enquanto este modelo apresenta apenas características regionais da bacia, um estudo gravimétrico da região poderia evidenciar anomalias Bouguer localizadas, que poderiam ser associadas a variações mineralógicas e pela presença de hidrocarbonetos, motivando assim maiores estudos da bacia e um interesse comercial renovado na região.

## Referências bibliográficas

- BABY, P.; HERMOZA, W.; NAVARRO, L.; BOLAÑOS, R.; ESPURT, N.; RODDAZ, M.; BRUSSET, S.; WILLY, G.. Geodinamica Mio-Plocena de las cuencas subandinas peruanas: um mejor entendimiento de los sistemas petroleros. In: V INGEPET. 2005.
- ECKHARDT, E.A.. A Brief History of the Gravity Method of Prospecting for Oil. In: Gulf Res. and Dev. Co., Annual Meeting, 1940, Chicago.
- EGÚSQUIZA, R.. Peru - Hydrocarbon exploration promotion in the fold thrust belt - Madre de Dios basin. 2004. Disponível em: <[www.systemdigital.com/peru/pdf/m.%20de%20dios%20a.pdf](http://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.
- GÓMEZ, C.O. & LAVADENZ, R.M.. Compendio de Geología de Bolivia – Cap. 8 - Potencial de hidrocarburos. *Revista Técnica de Yacimientos Petroliferos Fiscales Bolivianos* 18 (1-2), p. 145-166, 2000.
- HERMOZA, W. Dynamique tectono-sédimentaire et restauration séquentielle du retro-bassin d'avant-pays des andes centrales. 2004. 296 p. Docteur Sciences de la Terre et de l'Environnement, l'Université Paul Sabatier Toulouse III, Laboratoire d'étude de Mécanismes de Transfert em Géologie, Toulouse.
- HOUSE, N.J.; CARPENTER, D.G.; CUNNINGHAM, P.S.; BERUMEN, M.. Influence of Paleozoic Arches on Estrutural Style and Stratigraphy in the Madre de Dios Basin in Southern Peru and Northern Bolivia. 2000. Mobil Exploration and Producing Peru, Inc. Disponível em: <<http://scitation.aip.org/getabs/servlet>>. Acesso em: 20/12/2006.
- IHS Energy Company - ONLINE ORDERING SERVICE. Latin America. Madre de Dios basin. North América, 1995. 1 mapa. Disponível em: <[http://notesres.ihenergy.com/production/petronet/support/maps.nsf/webframeset?openframe set&\\$onlineshop&region=latin+america](http://notesres.ihenergy.com/production/petronet/support/maps.nsf/webframeset?openframe set&$onlineshop&region=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: Pando X-1 and Manuripe X-1 wells, in A. J. Tankard, R. Suárez S., H. J. Welsinki, *Petroleum Basins of South America: AAPG Memoir* 62, p. 231-249, 1995.
- JAILLARD, E.; HÉRAIL, G.; MONFRET, T.; MARTÍNEZ, E.D.; BABY, P.; LAVENU, A.; DUMONT, J.F.. Tectonic Evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia, and Northernmost Chile, in *Tectonic Evolution of South America*, Rio de Janeiro, 2000, p. 481-559.
- LOWRIE, W.. *Fundamentals of Geophysics*, Cambridge University Press, 1997, p. 29-81.

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: AAPG Memoir 62, 1995, 423-444.

MORETTI, I.; MARTINEZ, E.D.; MONTEMURRO, G.; AGUILLERA, E.; PEREZ, M.. Las rocas madre de Bolivia y su potencial petrolífero – Subandino-Madre de Dios-Chaco. *Revista Técnica de Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos* 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* 95 (7), 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* 95 (8), 84-87, 1997.

RAMOS, V.A.. Tectónica Andina – Andes Bolivianos. Laboratório de Tectônica Andina. Universidad de Buenos Aires. 2003. Disponível em: <[www.aviris.gl.fcen.uba.ar/tectonica\\_andina](http://www.aviris.gl.fcen.uba.ar/tectonica_andina)>. Acesso em: 02 de Janeiro de 2007.

REYNOLDS, J.M.. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Wiley and Sons. p. 32-90, 1997.

RODDAZ, M.; BABY, P.; BRUSSET, S.; HERMOZA, W.. Forebulge dynamics and environmental control in Western Amazonia: the case study of the arch of Iquitos (Peru). *Tectonophysics*, 399, p. 87-108, 2005.

SCOTT, M.. Earth Sciences Division NASA/GSFC Security and Privacy Statement. 2007. Disponível em: <<http://earthobservatory.nasa.gov/study/hydrosheds/>>. Acesso em: 01 de Maio de 2007.

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

TEIXEIRA, W. *et.al.*, Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p. 568.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P. & SHERIFF, R. E.. Applied Geophysics – Second Edition. Cambridge University Press. p. 645-699. 2000.

TORRES, D.C.. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana. Consejo Regional de Administración Regional de Madre de Dios. 2007. Disponível em: <[www.iiap.org.pe/publicaciones/cds/zonificacion/index.htm](http://www.iiap.org.pe/publicaciones/cds/zonificacion/index.htm)>. Acesso em: 01 de Maio de 2007.

TURCOTTE, D.L. & SCHUBERT, G.; \*\*\*. Geodynamics - Applications of Continuum Physics to Geological Problems. John Wiley and Sons. p. 198-224.

<http://geophysics.ou.edu/gravmag/measure/relative.html>

[http://pkukmweb.ukm.my/~rahim/gravity%20lecture\(MSc\).htm](http://pkukmweb.ukm.my/~rahim/gravity%20lecture(MSc).htm)