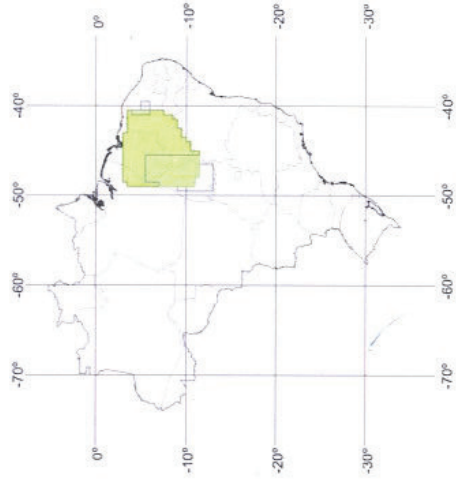


anp
Agência Nacional
do Petróleo,
Gás Natural e Biocombustíveis

Levantamentos Aerogeofísicos para a Identificação de Áreas com Ocorrência Potencial de Petróleo e Gás na Bacia do Parnaíba

TOMO VI: ÁREA PARNAÍBA, VOLUME I
Interpretação





anp
Agência Nacional
do Petróleo,
Gás Natural e Biocombustíveis

LEVANTAMENTOS AEROGEOFÍSICOS PARA A IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS COM OCORRÊNCIA POTENCIAL DE PETRÓLEO E GÁS NA BACIA DO PARNAÍBA

USST

TOMO VI: ÁREA PARNAÍBA, VOLUME I
INTERPRETAÇÃO

Convênio ANP-USP para o Desenvolvimento de Programa de
Transferência de Tecnologias e de Capacitação Técnica em Atividades
Relacionadas à Exploração de Hidrocarbonetos, com Ênfase
em Levantamentos Aerogeofísicos para a Identificação de Áreas
com Ocorrência Potencial de Petróleo e Gás na Bacia do Parnaíba

São Paulo, 29 de outubro de 2007

Organizadores:

Ricardo Paulino Marques, Fuad Kassab Jr., Eder Cassola Molina &
Francisco Arruda Raposo Andrade

Autores:

João Luiz de Paiva Martins, Claudia de Oliveira Rodriguez, Francisco de Assis Cavallaro &
Michelle David Watanabe

Sumário Executivo

O Brasil tem sido visto como uma das maiores fronteiras de exploração de hidrocarbonetos do planeta. O território brasileiro abriga um dos maiores conjuntos de bacias sedimentares da superfície terrestre – 6,4 milhões de km² (4,9 milhões em terra e 1,5 milhões em plataforma continental) – e, no entanto, não é possível estimar, com base em uma massa confiável e atualizada de dados e informações, o potencial petrolífero dessas bacias, não obstante os 50 anos de atividade exploratória no País.

O Plano Decenal de Estudos e Serviços de Geologia e Geofísica preparado pela ANP destacou, “no tocante à exploração petrolífera, ser fundamental aumentar o conhecimento geológico do território nacional, estimular o aumento da área sob concessão exploratória - hoje não superior a 5% do total das bacias sedimentares - e (...) obter novos dados e informações para reduzir o risco exploratório.”

Nesse contexto a realização de levantamentos geofísicos aéreos em larga escala no território brasileiro, utilizando tecnologias avançadas, constituiu medida essencial e urgente para que superemos o atual desconhecimento acerca do potencial de ocorrência em terra de petróleo e gás.

Tais levantamentos ensejaram uma identificação a custos baixos do potencial de ocorrência de hidrocarbonetos, permitindo:

- a identificação e seleção preliminar de áreas potenciais prioritárias de ocorrência de hidrocarbonetos, de modo a reduzir os elevados custos de exploração sísmica e estratigráfica,
- a delimitação mais precisa das áreas destinadas à licitação e exploração,
- a diminuição de riscos e dos níveis de investimentos, pesquisas associadas à prospecção e, finalmente,
- favorecimento do estabelecimento de preços mínimos mais elevados nas novas rodadas de licitação.

Tendo em vista a inexistência de empresas nacionais com domínio completo das tecnologias utilizadas neste domínio

tornou-se necessário, dada a escala continental de nosso território, fomentar a capacitação de segmentos estratégicos brasileiros para que se reduzisse a dependência externa do País a essas tecnologias críticas.

O presente trabalho foi executado no âmbito do convênio entre a ANP e a Universidade de São Paulo para a realização de aerolevantamentos na Bacia do Parnaíba.

Teve como objetivo a interpretação geológica dos dados dos aerolevantamentos, em adição a estes, trabalhos e publicações realizadas anteriormente. Foram feitos estudos de inversão 2D (perfis), mapas da profundidade do embasamento, mapas de ocorrências de rochas ígneas e mapas das estruturas mais importantes da bacia, entre outros.

Os principais capítulos deste volume contemplam:

- CAPÍTULO I, é a introdução deste relatório, o qual descreve os objetivos específicos do trabalho, bem como a estrutura do mesmo;
- CAPÍTULO II, contém os resultados obtidos com as diferentes metodologias aplicadas;
- CAPÍTULO III, mostra uma visão geral sobre a geologia da área, suas principais unidades, evolução geológica e estrutural, assim como das regiões adjacentes;
- CAPÍTULO IV, onde estão listados os dados de trabalhos realizados anteriormente os quais serviram de base para o processo interpretativo (dados exploratórios), juntamente com as características do levantamento atual;
- CAPÍTULO V, refere-se às metodologias aplicadas para a composição dos resultados;
- CAPÍTULO VI, lista as bibliografias utilizadas.

Equipe da ANP

Direção

Haroldo Borges Rodrigues Lima (Diretor Geral)
Sebastião do Rego Barros¹ (Diretor Geral)
Newton Reis Monteiro (Diretor)
John M. Albuquerque Forman² (Diretor)

Coordenação

Magda Chambriard (Superintendente, SEP)
Kátia Duarte (Superintendente adjunto, SDB)
Milton Romeu Franke³ (Superintendente, SDB)

Corpo Técnico

Rafael Bastos (SEP)
Cid Fontes (SDB)
Luiz Fernando (SDT)
Roberto Souza⁴ (SDB)
Sandro Mercio⁵ (SDB)

Principais Entidades

Brasil

Agência Nacional do Petróleo, ANP
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EP/USP
Inst. Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP/IAG
Aerogeofísica LatinoAmerica, AGP-LA
Fundação de Aplicação de Tecnologias Críticas⁶, ATECH
Instituto de Estudos Avançados⁷, IEAV/CTA
Instituto de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, IDCT
Táxi Aéreo Marília S.A., TAM

Rússia

Aerogeophysics Empresa Estatal de Produção e Ciência, AGP
Centro Rússia Brasil de Cooperação Tecnológica, CRBCT
Univ. I.M. Gubkin do Petróleo e Gás, GUBKIN
Univ. Estatal V. M. Lomonosov de Moscou, MSU
Univ. Técnica Estatal N.E Bauman de Moscou, MSTU
Centro Científico Governamental Iuzhmoregeologia, IGNC

Organismos Internacionais

Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial, ONUDI
Rede de informação Tecnológica da América Latina, RITLA

¹ de 12/02 a 01/05; ² de 12/02 a 01/06; ³ de 12/02 a 03/06; ⁴ de 12/02 a 10/05; ⁵ de 12/02 a 10/05; ⁶

Equipe do Projeto

Coordenação Institucional

Ricardo Paulino Marques

Coordenação Executiva

Francisco Arruda Raposo Andrade

Núcleo Administrativo

Clarissa R P C Gomes (coordenação)
Décio Gomes (contabilidade)
Néida Carvalho (contabilidade)
Shirley Molina (contabilidade)

Núcleo de Pesquisa & Desenvolvimento

João Luiz de Paiva Martins (P&D - coordenação)
Edson Kurihara (P&D software)
Henrique Bucher (P&D software)
Ricardo Akira Azana (P&D software)
Francisco de Assis Cavallaro (P&D software/geofísica)
Renato Gimenez (P&D gravimetria e magnetometria)
Viktor Koldaev (P&D gravimetria)
Rafael Valadares (P&D gamaespectrometria)

Núcleo de Geofísica

Luciano Konzen (coordenação)
Henrique DalPozzo (processamento grav/mag)
Leandro Moutinho (processamento gama/mag)
23 geofísicos de campo

Núcleo de Logística

Egor Roditchkine (coordenação)
Amarildo Cordeiro (administração de campo)
Paulo Savioli (administração de campo)
Jorge Theodoro Santos (administração de campo)

Núcleo de Operação

41 pilotos e co-pilotos⁶
15 técnicos de manutenção aeronáutica⁶
18 operadores de equipamentos especiais⁷
36 técnicos de bases de monitoramento⁸
7 tradutores e intérpretes⁸

Núcleo de Interpretação

João Luiz de Paiva Martins (coordenação)
Claudia de Oliveira Rodriguez (geologia)
Francisco de Assis Cavallaro (geofísica)
Michelle David Watanabe (geofísica)

⁶ disponibilizados pela TAM; ⁷ disponibilizados pela TAM e AGP-LA; ⁸ disponibilizados pela USP, RITLA e AGP-LA

Consultores

AGP

Sergey Pavlov (geofísico)
Ivan Tikhonov(engenharia)
2 Geofísicos de campo
5 Engenheiros
3 Desenvolvedores especiais

GSC

2 Operadores equipamentos especiais

GUBKIN

Patrick G. Killeen (membro emerito, geologia)
Sergey Serkerov (geofísico)
Aleksander Charitonov (geofísico)

IGNC

Ivan Miroshnichenko (engenharia)
Iliya Pirozhenko (engenharia)
Alexander Rudnev (geofísica)
Vladimir Lygin (geofísica)

MSTU

Alexandre Bykovsky (engenharia)

MSU

Oleg Movsesyan (direção)
Pavel Babayants (geofísica)

RITLA

Carlos Serapião (coordenação)

USP/IAG

Eder Molina (gravimetria)
Wladimir Shukowski (magnetometria)
Fernando Brenha Ribeiro (gamaespectrometria)
Naomi Ussami (gravimetria)
Ana Maria Goês (geologia)

USP/EP

Fuad Kassab Junior(engenharia)
Ricardo Paulino Marques(engenharia)
José Roberto Piqueira (engenharia)

UNIDO/CRBCT

Sergey Korotkov (direção)
Vladimir Kozharnovich (direção)
Artem Ivanshenko (geofísica)
Aleksander Luchnikov (geofísica)
Yuri Pepeleayv (engenharia)
Alexey Kuznetsov (operação de sistemas)
Sergey Gerasimov (operação de sistemas)

Índice Geral

CAPÍTULO I APRESENTAÇÃO	10	2.7.1 Inversão 3D pelo REIST (Sigma 3D)	44
1.0 APRESENTAÇÃO	11	CAPÍTULO III GEOLOGIA	48
1.1 INTRODUÇÃO	11	3.0 GEOLOGIA	49
1.2 OBJETIVO	11	3.1 INTRODUÇÃO	49
1.3 ESTRUTURA DO RELATÓRIO	11	3.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS DA ÁREA DO PROJETO PARNAÍBA	49
CAPÍTULO II RESULTADOS	12	3.3 BACIA DO PARNAÍBA.....	49
2.0 RESULTADOS	13	3.4 BACIA DO GRAJAU'	51
2.1 INTRODUÇÃO	13	3.5 EMBASAMENTO E ARCABOUÇO TECTÔNICO	51
2.2 MODELAGEM DIRETA – PERFIS GRAVIMÉTRICOS.....	13	CAPÍTULO IV DADOS EXPLORATÓRIOS	53
2.2.1 Perfil 1	17	4.0 DADOS EXPLORATÓRIOS	54
2.2.2 Perfil 1.5	17	4.1 INTRODUÇÃO	54
2.2.3 Perfil 2.5	17	4.2 HISTÓRICO DOS ESTÁGIOS EXPLORATÓRIOS	54
2.2.4 Perfil 3	17	4.3 ACERVO DE DADOS	54
2.2.5 Perfil 4	17	4.3.1 Sísmica de Reflexão	54
2.2.6 Perfil 5 mais 2	23	4.3.2 Métodos Potenciais	54
2.2.7 Perfil 7	23	4.3.3 Sondagens	55
2.2.8 Perfil 8	23	4.3.4 Materiais Suplementares	55
2.2.9 Perfil 9	23	4.4 AEROLEVANTAMENTO DA BACIA DO PARNAÍBA	55
2.2.10 Perfil 10	23	4.4.1 Localização	55
2.2.11 Perfil 11	29	4.4.2 Aquisição de Dados	55
2.2.12 Perfil 12	29	4.4.3 Características do Levantamento	55
2.2.13 Considerações sobre os Underplating.....	29	4.4.4 Aeromagnetometria.....	55
2.3 LINEAMENTOS MAGNÉTICOS.....	34	4.4.5 Aerogravimetria	55
2.3.1 Lineamentos Traçados pelas Derivadas Horizontais de Segunda Ordem	34	4.4.6 Sistemas de Apoio para Aquisição de Dados	56
2.3.2 Lineamentos pela Análise Espectral (Coscad 3D)	34	CAPÍTULO V METODOLOGIA	57
2.4 MAPAS DE PROFUNDIDADE DO EMBASAMENTO	37	5.0 METODOLOGIA	58
2.5 MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DAS ESTRUTURAS GRABENFORMES	37	5.1 INTRODUÇÃO	58
2.6 MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ROCHAS ÍGNEAS.....	37	5.2 MODELO ISOSTÁTICO / FLEXURAL (MODELOS CLÁSSICOS DE ISOSTASIA).....	58
2.7 RESULTADOS DA INVERSÃO PELO PACOTE SIGMA 3D	44	5.2.1 Modelo de Airy-Heiskanen.....	58

5.2.2	Modelo de Pratt-Hayford	58
5.2.3	Modelo de Compensação Regional	59
5.3	MODELO ISOSTÁTICO GENERALIZADO	59
5.4	SEPARAÇÃO REGIONAL-RESIDUAL	59
5.5	MODELAGEM GRAVIMÉTRICA DIRETA 2D – ALGORISMO DE TALWANI	60
5.6	METODOLOGIA PARA CRIAÇÃO DO MAPA DE EMBASAMENTO	61
5.7	MAPAS DE ROCHAS ÍGNEAS BÁSICAS	61
5.7.1	Filtragem da Malha de Dados	61
5.7.2	Análise Espectral	66
5.7.3	Calibração com Dados de Poço	66
5.7.4	Fontes Principais de Erros	67
5.7.5	Profundidade de Rochas Básicas	67
5.7.6	Espessura Agregada da Camada de Rochas Básicas	68
5.7.7	Profundidade do Fundo da Camada de Rochas Ígneas	69
5.7.8	Classificação da Presença de Rochas Básicas	70
5.8	ABORDAGENS COM SOFTWARES DE ANÁLISE ESPECTRAL	70
5.8.1	Análise Através do Pacote Sigma 3D	70
5.8.2	Análise Através do Software Coscad 3D	71
	CAPÍTULO VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
	6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
	CAPÍTULO VII ANEXOS	80

Lista de Figuras

- Figura 2.1 - Mapa de anomalia Bouguer residual flexural 14
- Figura 2.2 - Mapa de campo magnético total - continuado a 50km 15
- Figura 2.3 - Distribuição dos 12 perfis selecionados na área para a modelagem 16
- Figura 2.4 - Perfil gravimétrico 1 modelado: a) campos gravimétricos observado e modelado; b) modelo resultante da modelagem. 18
- Figura 2.5 - Perfil gravimétrico 1.5 modelado: a) campos gravimétricos observado e modelado; b) modelo resultante da modelagem. 19
- Figura 2.6 - Perfil gravimétrico 2.5 modelado: a) campos gravimétricos observado e modelado; b) modelo resultante da modelagem; c) zoom da escala vertical favorecendo a visualização do corpo a aproximadamente 20km. 20
- Figura 2.7 - Perfil gravimétrico 3 modelado: a) campos gravimétricos observado e modelado; b) modelo resultante da modelagem; c) zoom da escala vertical favorecendo a visualização do corpo a aproximadamente 20km. 21
- Figura 2.8 - Perfil gravimétrico 4 modelado: a) campos gravimétricos observado e modelado; b) modelo resultante da modelagem. 22
- Figura 2.9 - Perfil gravimétrico 5 mais 2 modelado: a) campos gravimétricos observado e modelado; b) modelo resultante da modelagem. 24
- Figura 2.10 - Perfil gravimétrico 7 modelado: a) campos gravimétricos observado e modelado; b) modelo resultante da modelagem; c) zoom da escala vertical favorecendo a visualização do corpo a aproximadamente 20km. 25
- Figura 2.11 - Perfil gravimétrico 8 modelado: a) campos gravimétricos observado e modelado; b) modelo resultante da modelagem; c) zoom da escala vertical favorecendo a visualização do corpo a aproximadamente 20km. 26
- Figura 2.12 - Perfil gravimétrico 9 modelado: a) campos gravimétricos observado e modelado; b) modelo resultante da modelagem. 27
- Figura 2.13 - Perfil gravimétrico 10 modelado: a) campos gravimétricos observado e modelado; b) modelo resultante da modelagem. 28
- Figura 2.14 - Perfil gravimétrico 11 modelado: a) campos gravimétricos observado e modelado; b) modelo resultante da modelagem. 30
- Figura 2.15 - Perfil gravimétrico 12 modelado: a) campos gravimétricos observado e modelado; b) modelo resultante da modelagem; c) zoom da escala vertical favorecendo a visualização do corpo a aproximadamente 20km. 31
- Figura 2.16 - Mapa de anomalia Bouguer residual flexural com altos aparentes 32
- Figura 2.17 - Mapa de anomalia Bouguer com descrição dos perfis modelados e localização dos *underplatings*. 33
- Figura 2.18 - Mapa de lineamentos magnéticos. (a) mapa da 2ª derivada em X; (b) mapa da 2ª derivada em Y; (c) mapa da 1ª derivada em Z e (d) associação dos lineamentos identificados nas 3 direções 35
- Figura 2.19 - Principais lineamentos estruturais interpretados a partir da avaliação qualitativa dos dados aeromagnéticos processados segundo o software Coscad 3D 36
- Figura 2.20 - Mapa de profundidade do embasamento 38
- Figura 2.21 - Distribuição das estruturas grabeniformes identificadas pela gravimetria 39
- Figura 2.22 - Mapa de profundidade do embasamento com contorno do topo das rochas ígneas (cf item 5.7) 40
- Figura 2.23 - Mapa da profundidade do embasamento com o contorno da base das rochas ígneas (cf item 5.7) 41
- Figura 2.24 - Mapa da distribuição das rochas ígneas (cf item 5.7) 42
- Figura 2.25 - Mapa de campo magnético total de alta resolução 43
- Figura 2.26 - Modelos de distribuições de densidade (A e D) e magnetização efetiva (B e C) 45
- Figura 2.27 - Correlação de estruturas através de modelagem residual 46
- Figura 2.28 - Mapas magnetométrico e gravimétrico, respectivamente, com sobreposição de mapa geotectônico do embasamento de Góes *et al* (1993) 47
- Figura 2.29 - Mapas magnetométrico e gravimétrico, respectivamente, com sobreposição de mapa arcabouço estrutural integrado de Góes *et al* (1993) 47
- Figura 3.1 - Limites geológicos das bacias do Parnaíba, São Luis e Grajaú. Mod. de SANTOS & CARVALHO, 2004. 50
- Figura 3.2 - Carta estratigráfica das bacias do Parnaíba e Grajaú. 50
- Figura 3.3 - Estruturas do Ciclo Brasileiro de compartimentação no paleozóico segundo Fortes, 1978. (A) Lineamento Tocantins (B) Lineamento Picos-Santa Inês (C) Lineamento Transbrasiliano. Mod. de SANTOS & CARVALHO, 2004. 51
- Figura 4.1 - Mapa de localização do Projeto Parnaíba. Em vermelho, os limites cobertos pelo aerolevanteamento; em verde a delimitação da área geográfica das bacias do Parnaíba e Grajaú 56
- Figura 5.1 - Modelos de compensação isostática: (a) Airy-Heiskanen, (b) Pratt-Hayford, (c) Vening-Meinesz. 58
- Figura 5.2 - Representação de uma camada rochosa por uma seção poligonal irregular 60
- Figura 5.3 - Seção poligonal irregular descrita por 14 vértices e mostrando as distâncias e

ângulos usados para cálculo da atração gravitacional vertical no ponto P pelas equações 5.1 e 5.2.....	60
Figura 5.4 - Modelo preliminar do embasamento calculado pelo Platô de Bouguer.....	62
Figura 5.5 - Diferença do campo gerado pelo modelo do Platô de Bouguer para o residual gravimétrico.....	63
Figura 5.6 - Correções da profundidade obtida pela modelagem direta.....	64
Figura 5.7 - Fluxo de informações e trabalho – Profundidade do embasamento.....	65
Figura 5.8 - Processamento espectral da alta frequência magnética. Em (a) malha de dados da região analisada; em (b) zoom da área; em (c) máscara de análise do espectro e em (d) visualização do espectro da área analisada.....	66
Figura 5.9 - Análise da distribuição do espectro.....	66
Figura 5.10 - Profundidades das camadas de rochas básicas.....	68
Figura 5.11 - Espessuras das camadas de rochas básicas.....	69
Figura 5.12 - Fluxo de informações e trabalho – Profundidade e espessura dos basaltos.....	72
Figura 5.13 - Classificação da presença de rochas básicas: laranja - ígneas, azul - vazios, verde - altos do embasamento e <i>dummies</i>	73
Figura 5.14 - Média radial dos espectros de potencia para os dados de anomalia Bouguer e anomalia magnética, respectivamente.....	74
Figura 5.15 - Modelos de gravimetria: campo reduzido (A e C) e distribuição de densidades (B e D).....	75
Figura 5.16 - Modelos de magnetometria: campo reduzido (A e C) e distribuição de magnetização efetiva (B e D).....	76

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Resumo das informações do perfis utilizados.....	13
Tabela 5.1 - Poços utilizados para calibração.....	67
Tabela 5.2 - Comparação de poços para determinação de profundidade.....	68
Tabela 5.3 - Poços descartados como atípicos (<i>outliers</i>).....	68
Tabela 5.4 - Comparação de poços para determinação de espessura agregada.....	69
Tabela 5.5 - Poços considerados atípicos (<i>outliers</i>).....	69
Tabela 5.6 - Profundidade em km das camadas de acordo com cálculo de coeficiente angular	70