



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Vitor Eustáquio Silveira de Felipe

**Influência do paleorelevo na segmentação da Plataforma Carbonática
Albiana, localizada no Alto de Badejo ao sul da Bacia de Campos**

Rio de Janeiro

2017

Vitor Eustáquio Silveira de Felipe

**Influência do paleorelevo na segmentação da Plataforma Carbonática
Albiana, localizada no Alto de Badejo ao sul da Bacia de Campos.**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção de título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geologia Estrutural, Análise de Bacias, Geofísica e Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Horta de Almeida

Coorientador: Dr. Mario Neto Cavalcanti de Araujo

Rio de Janeiro

2017

Vitor Eustáquio Silveira de Felipe

**Influência do paleorelevo na segmentação da Plataforma Carbonática Albiana,
localizada no Alto de Badejo ao sul da Bacia de Campos.**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção de título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geologia Estrutural, Análise de Bacias, Geofísica e Recursos Minerais.

Aprovado em 24 de março de 2017.

Coorientador: Dr. Mario Neto Cavalcanti de Araujo
CENPES – Petrobras

Banca Examinadora:

Prof. Dr Julio Cesar Horta de Almeida (Orientador)

Faculdade de Geologia – UERJ

Prof. Dr. Webster Ueispas Mohriak

Faculdade de Geologia – UERJ

Dr. Delzio de Lima Machado Junior

EXP/AEXP-M/ML - Petrobras

Rio de Janeiro

2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

F315 Felipe, Vitor Eustáquio Silveira de.
Influência do paleorelevo na segmentação da Plataforma Carbonática Albiana, localizada no Alto de Badejo ao sul da Bacia de Campos. / Vitor Eustáquio Silveira de Felipe. – 2017. 133 f. : il.

Orientador: Julio Cesar Horta de Almeida.
Co-Orientador: Mario Neto Cavalcanti de Araujo
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.
Bibliografia.

1. Geologia estrutural – Campos, Bacia de (RJ) – Teses. 2. Sedimentação e depósitos – Campos, Bacia de (RJ) – Teses. 3. Levantamentos geológicos - Campos, Bacia de (RJ) – Teses. 4. Geofísica – Campos, Bacia de (RJ) – Teses. 5. Tectônica salífera – Campos, Bacia de (RJ) – Teses. I. Almeida, Julio Cesar Horta de. II. Araujo, Mario Neto Cavalcanti de. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. III. Título.

CDU 551.243(815.3)

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer primeiramente a minha família em especial aos meus pais que me serviram de inspiração como pessoa e como profissional.

A minha esposa e meu filho, que me dedicaram amor e carinho durante estes dois anos, e que sem este apoio, não seria possível ter feito este trabalho.

Em especial aos professores Júlio Almeida (UERJ), meu orientador, e Mario Neto (PETROBRAS), meu coorientador, que acompanharam o andamento do trabalho, incentivando e contribuindo sempre com boas idéias.

Gostaria de agradecer ao pessoal do CENPES/PDEP/GEOTEC (PETROBRAS), em especial a Monica Pequeno, Silvia Negrão, Thiago Falcão, Vitor Savastano e Marco Antônio Romeiro.

Gostaria de agradecer ao pessoal da gerencia GIA-E&P/EREE/ESTR (PETROBRAS), onde trabalho, e em especial ao engenheiro Igor Henriques, meu chefe, que me apoiou quando eu precisei ir várias vezes para a Uerj, mesmo sendo o mestrado com liberação parcial.

Aos colegas do Laboratório de Estudos Tectônicos da UERJ: Henrique Bruno, Michael McMaster e Aimeee Guida.

Gostaria de agradecer ao Savio Francis Garcia, Consultor da Petrobrás, pela ajuda nas restaurações estruturais.

Agradeço pôr fim aos profissionais da TECGRAF – PUC: Camila de Almeida e Diego Brito pelo apoio, sempre que precisei, para utilizar o Recon MS.

Se você se cansar, aprenda a descansar, não a desistir.

Autor desconhecido

RESUMO

Felipe, Vitor Eustáquio Silveira de. **Influência do paleorelevo na segmentação da Plataforma Carbonática Albiana, localizada no Alto de Badejo ao sul da Bacia de Campos.** 2017. 133 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Controladas por trapas mistas, as acumulações de hidrocarbonetos da plataforma carbonática de águas rasas do Alto de Badejo na porção sul da Bacia de Campos, possuem histórico de mais de 30 anos de produção. Embora sejam bem conhecidas em termos de fácies e de propriedades permoporosas, essas acumulações ainda são emblemáticas quanto ao seu controle estrutural. Uma questão fundamental reside na influência do embasamento passivo abaixo do sal na fragmentação da plataforma e quanto desse processo pode ainda estar registrado no arcabouço estrutural e na estruturação interna em campos petrolíferos. A investigação destes campos, localizados sobre um relevo na base do sal, conformados em degraus herdados do embasamento e com uma inflexão estrutural de direção N-S variando para NESW, mostra um sistema de falhas que reflete o processo de fragmentação da plataforma carbonática num estágio estacionário pós deslizamento gravitacional influenciado pela geometria da base do sal. Essa constatação foi alcançada por meio do mapeamento sísmico 3D, integrado com dados de poços (perfis elétricos e testemunho), atributos sísmicos, reconstituições de seções geológicas e de mapas palinspáticos do topo da plataforma carbonática. Foi identificada uma clara associação entre os degraus do embasamento e o padrão de falhas geradas que segmentam a plataforma carbonática em dois diferentes padrões de deslocamento horizontais: um aproximadamente paralelo, com influência de um anteparo estrutural na parte sul da área, gerando falhas normais planares de direção predominantemente NW-SE e outro com aspecto divergente, influenciado pela geometria convexa do embasamento, marcado por falhas lítricas radiais e divergentes, de direção N-S e NNW-SSE. Os maiores estiramentos horizontais medidos nas seções reconstituídas foram de 7%, acumulados predominantemente pelas falhas lítricas na parte leste da área. Ao norte da área, o efeito do degrau do embasamento foi menor, representado pelos menores valores de estiramento. Esse comportamento é sintomático do maior grau de acoplamento entre os sedimentos acima do sal e aqueles relacionados à fase de subsidência termal da bacia nesta porção da área. Analisando a deformação desde a idade Aptiana até o Recente, percebe-se um pico de estiramento no intervalo de idade Cenomaniano - Neoalbiano, que pode estar associado a um provável basculamento da bacia para E-SE. No final do Cretáceo houve uma redução na quantidade de estiramento horizontal, atingindo valores próximos de zero desde o Paleógeno. Essa tectônica raft, controlou fortemente a deposição das sequências mesoalbianas que contêm os intervalos deposicionais das principais fácies sedimentares dos campos petrolíferos desta porção da Bacia de Campos. Os deslizamentos gravitacionais continuaram até o intervalo Cenomaniano - Neoalbiano, com o preenchimento de grabens e calhas controladas por falhas lítricas.

Palavras-chave: Plataforma carbonática. Degráus herdados. Atributos sísmicos. Tectônica raft. Mapa palinspático. Restauração estrutural.

ABSTRACT

Felipe, Vitor Eustáquio Silveira de. **Influence of paleorelief on structural segmentation of Albian carbonate platforms at the Badejo High, Southern Campos Basin.** 2017. 133 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

The shallow water carbonate rocks lying above the Badejo Basement High have over 30 years of successful oil production. Well known in terms of stratigraphic arrangement and permo-porosity, these accumulations are problematic when the subject is its structural control. One relevant point regarding these accumulations is whether or not the paleorelief below these carbonate platform controlled the fragmentation and downslope gravity movements and how much of these processes influenced the internal compartments of producing oil fields. In detail, the oil fields at the Badejo High are above salt pillows and welds, overlying a buried basement step that, in map view, bends from N-S to NE-SW. Gravitational structures in the sedimentary sequences above the salt layer are mostly collinear with the paleorelief architecture of the basement beneath. Such alignment motivated the investigation of a possible passive influence of the substrate after cessation of the fragmentation and basinward gliding processes. Evidences supporting this idea came from an integrated approach that included analysis of well-logs, seismic interpretation, section restoration and generation of palinspastic maps. These techniques revealed a clear association of the buried basement step and the salt-related fault patterns. Two distinct fault arrangements were identified: one of NW-SE subparallel planar normal faults, strongly conditioned by a frontal backstop, located at the southern portion of the studied area; and another with radial divergent map view, dominated by non-planar N-S to NNW-SSE listric faults, following with the buried bend of the basement high. Cross-section restorations revealed that greater extensions of 7% were accumulated in the listric fault domain, whereas in the planar fault systems, away from the bent paleorelief, the lateral displacements were inexpressive. Such behaviour suggests different coupling degrees between substrate beneath the salt layer and the carbonate platform above it. The tracking of lateral movements through time deduced from the sequential restoration indicates that the apices of deformation occurred in the Eoalbian-Cenomanian and it was likely associated to the ESE tilting of the basin. The progressive deceleration of the basinward gliding started in the Late Cretaceous till its complete cessation in the Paleogene.

Keywords: Carbonate platform. Inherited steps. Seismic attributes. Raft Tectonics. Palinspastic Map. Structural restoration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Acumulações de hidrocarbonetos na Bacia de Campos	18
Figura 2 –	Mapa estrutural do embasamento da Bacia de Campos.....	20
Figura 3 –	Poços utilizados para a correlação estratigráfica e amarração sísmica...	22
Figura 4 –	Poço com perfil elétrico típico da área.....	23
Figura 5 –	Área de abrangência e parâmetros de aquisição sísmica utilizados.....	24
Figura 6 –	Seção sísmica leste-oeste em profundidade, mostrando os horizontes sísmicos mapeados ajustados aos dados de poços.....	25
Figura 7 –	Fluxo de trabalho para a construção do modelo estrutural.....	26
Figura 8 –	Localização da área na margem continental brasileira com as cinco seções sísmicas usadas na restauração.....	29
Figura 9 –	Perfil local de evolução paleobatimétrica.....	30
Figura 10 –	Curva de taxa de extensão versus tempo para cinco seções restauradas na Bacia de Campos.....	31
Figura 11 –	Etapas da restauração estrutural em mapa.....	32
Figura 12 –	Construção do mapa de falhas conectadas.....	34
Figura 13 –	Mapa de reconstrução tectônica das bacias sedimentares na configuração pré-deriva continental.....	36
Figura 14 –	Localização dos cinturões de faixas móveis e crátons na América de Sul e África. (Gondwana Ocidental).....	37
Figura 15 –	Desenho esquemático ilustrando o desenvolvimento tectônico de um sistema de rifte continental baseado no rifte do leste africano.....	41
Figura 16 –	Mapa de anomalia gravimétrica das Bacias de Campos e Santos.....	42
Figura 17 –	Carta estratigráfica da Bacia de Campos.....	43
Figura 18 –	Evolução da abertura do Atlântico Sul.....	45
Figura 19 –	Seção geológica esquemática mostrando as subdivisões da Bacia de Campos.....	47
Figura 20 –	Mapa tectônico simplificado das Bacias de Campos e Santos com as principais estruturas halocinéticas.....	48
Figura 21 –	Curva de densidade versus profundidade para vários litotipos.....	50
Figura 22 –	Resistência de vários tipos de rochas durante a tensão e a compressão..	51

Figura 23 –	Diferenças de pressão litostática induzindo um fluxo do sal.....	52
Figura 24 –	Modelo de simulação física para o delta do Níger, mostrando a evolução de um espalhamento radial de uma sequência deltaica, utilizando um arcabouço com degraus de embasamento gerados por zonas de fraturas.....	54
Figura 25 –	Principais tipos de deslizamento gravitacional.....	54
Figura 26 –	Formas das estruturas de sal.....	56
Figura 27 –	Bloco diagrama com os esforços típicos da tectônica salífera.....	57
Figura 28 –	Parâmetros estruturais de uma falha normal.....	58
Figura 29 –	Controle do <i>rollover</i> pela forma da falha lítrica.....	59
Figura 30 –	Esquema de estruturas comumente encontradas em margens continentais passivas com descolamento de sal.....	60
Figura 31 –	Modelo mostrando a sequência de desenvolvimento de <i>rafts</i>	62
Figura 32 –	Restauração estrutural unidimensional.....	65
Figura 33 –	Restauração estrutural com área constante.....	65
Figura 34 –	Deformação em estilo dominó.....	66
Figura 35 –	Deformação da capa acima de uma falha lítrica.....	67
Figura 36 –	Deslizamento flexural mantendo a espessura e área constantes.....	69
Figura 37 –	Curva de decaimento da porosidade com a profundidade.....	69
Figura 38 –	Seção geológica da parte sul da Bacia de Campos.....	71
Figura 39 –	Mapa estrutural do embasamento e da base do Sal na área de estudo.....	73
Figura 40 –	Modelo mostrando a fase de desenvolvimento de <i>rafts</i> na área de estudo.....	74
Figura 41 –	Domínios estruturais na plataforma carbonática impressa pela tectônica raft.....	76
Figura 42 –	Carta estratigráfica simplificada com os 13 horizontes interpretados nos perfis sísmicos e nos poços durante o estudo.....	78
Figura 43 –	Seção em profundidade mostrando os horizontes sísmicos mapeados em detalhe com os dados dos de <i>gamma ray</i> e um perfil de litologia padrão.....	78
Figura 44 –	Horizontes mapeados em 3D na área de estudo.....	82
Figura 45 –	Estrutura planar representada no espaço tridimensional e suas	

componentes.....	83
Figura 46 – Mapa de atributo <i>Dip</i> calculado a partir dos horizontes.....	84
Figura 47 – Mapa de atributo <i>Dip</i> com origem no volume de atributo sísmico.....	84
Figura 48 – Mapa de atributo <i>Variance</i>	85
Figura 49 – Exemplo de secção sísmica na área em amplitude e após o TECVA.....	86
Figura 50 – Mapa de falhas das sequencias de idade pós-sal com os atributos de <i>Variance</i> e <i>Dip</i>	87
Figura 51 – Mapa estrutural da base do Aptiano com os <i>horst</i> de Linguado e Pampo.....	89
Figura 52 – Mapa estrutural do topo da plataforma carbonática com os diferentes compartimentos estruturais.....	91
Figura 53 – Diferentes padrões de falhas das sequencias de idade pós-sal.....	92
Figura 54 – Variação na qualidade do reservatório de acordo com a posição estrutural no campo de Pampo.....	94
Figura 55 – Mapa de isópacas do intervalo Albiano + Cenomaniano com as falhas das sequencias de idade pós-sal.....	95
Figura 56 – Isópacas do intervalo Albiano + Cenomaniano no campo de Linguado.....	96
Figura 57 – Seções geológicas em profundidade selecionadas para a restauração....	98
Figura 58 – Sequência de restauração estrutural em múltiplas seções.....	99
Figura 59 – Gráfico de alongação total em cada seção restaurada.....	100
Figura 60 – Etapas da restauração estrutural para a seção 3.....	101
Figura 61 – Redução da área de sal (em seção) e taxas médias de incremento de deslocamento e alongação das seções.....	104
Figura 62 – Gráfico de geo-história de descompactação para o perfil 1D.....	105
Figura 63 – Mapas de blocos de falhas do horizonte de topo do Cenomaniano-Neoalbiano.....	107
Figura 64 – Campos de rejeitos finitos para o horizonte topo Cenomaniano - Neoalbiano e rotações finitas de cada bloco.....	108
Figura 65 – Seção estratigráfica pré-sal passando pelos poços da área.....	110
Figura 66 – Efeito do baixo estrutural nas linhas de fluxo do sal.....	111
Figura 67 – Padrão em degraus da base do sal influenciando na posição e geração	114

	das falhas lístricas.....	
Figura 68 –	Mapa de compilação com todas as falhas da área.....	115
Figura 69 –	Distintos padrões de fluxo devido a geometria da base do sal.....	116
Figura 70 –	Modelo conceitual das estruturas formadas por espalhamento radial a partir de um embasamento com degraus no alto de badejo na parte sul da Bacia de Campos.....	117
Figura 71 –	Etapas da restauração estrutural para a seção 1.....	130
Figura 72 –	Etapas da restauração estrutural para a seção 2.....	131
Figura 73 –	Etapas da restauração estrutural para a seção 4.....	132
Figura 74 –	Etapas da restauração estrutural para a seção 5.....	133

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	16
1	LEVANTAMENTO DO PROBLEMA, OBJETIVO E MOTIVAÇÃO.....	18
2	MATERIAIS.....	21
2.1	Poços.....	22
2.2	Dado sísmico.....	23
3	METODOLOGIA.....	26
3.1	Mapeamento estrutural.....	26
3.2	Restauração em múltiplas seções.....	27
3.3	Restauração palinspática em mapas.....	32
4	GEOLOGIA REGIONAL.....	35
4.1	A Bacia de Campos.....	35
4.2	Contexto Geotectônico.....	36
4.3	Evolução Tectono-Sedimentar.....	38
4.4	Principais feições estruturais.....	40
4.5	Estratigrafia.....	43
4.6	Domínios tectônicos relacionados à tectônica de sal.....	47
5	CONCEITOS FUNDAMENTAIS EM TECTONICA SALÍFERA.....	49
5.1	Propriedades da camada de sal.....	49
5.1.1	<u>Densidade</u>.....	49
5.1.2	<u>Resistência</u>.....	50
5.1.3	<u>Viscosidade</u>.....	51
5.1.4	<u>Condutividade térmica</u>.....	52
5.2	Causas da movimentação do sal.....	52
5.3	Controles sobre o fluxo do sal em ambientes distensivos.....	53
5.4	Estruturas halocinéticas.....	55
5.4.1	<u>Geometria dos corpos evaporíticos</u>.....	55
5.4.2	<u>Estruturas de sobrecarga do sal</u>.....	56
5.5	Tectônica Raft.....	61
6	CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE RESTAURAÇÃO E BALANCEAMENTO DE SEÇÃO.....	62

6.1	Princípio	63
6.2	Restauração de seções geológicas	63
6.2.1	<u>Preservação de área e comprimento</u>	64
6.2.2	<u>Restauração de blocos rígidos</u>	65
6.2.3	<u>Restauração de blocos não rígidos</u>	66
6.2.3.1	Cisalhamento simples.....	66
6.2.3.2	Deslizamento Flexural.....	67
6.3	Efeito da compactação das camadas	68
7	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDO	69
7.1	Geologia Estrutural	69
7.1.1	<u>Domínio estrutural</u>	69
7.1.2	<u>Embasamento</u>	71
7.1.3	<u>Plataforma Carbonática</u>	73
7.2	Estratigrafia da área	74
8	INTERPRETAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS ESTRUTURAIS E ESTRATIGRÁFICOS	78
8.1	Interpretação sísmica dos horizontes	78
8.2	Atributos Sísmicos	80
8.2.1	<u>Dip e Azimute</u>	82
8.2.2	<u>Variance</u>	84
8.2.3	<u>TECVA</u>	84
8.3	Análise estrutural-estratigráfica	87
8.3.1	<u>Embasamento</u>	87
8.3.2	<u>Plataforma Carbonática</u>	89
9	RESULTADOS DAS RESTAURAÇÕES ESTRUTURAIS	96
9.1	Restauração de Múltipla Seções	96
9.2	Restauração Palinspática em Mapa	104
10	DISCUSSÕES	108
10.1	Origem dos degraus na base do Sal	108
10.2	Modelo de evolução do sistema de falhas	110
10.3	Evolução temporal da deformação	117
10.4	Evolução da camada de Sal	117
	CONCLUSÕES	118

REFERÊNCIAS	119
APÊNDICE - Etapas das seções restauradas	128

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas os avanços tecnológicos provenientes da modelagem de processos tectônicos, somados à crescente melhora da qualidade sísmica, e bem como da aquisição de informação de perfis elétricos de poços, promoveram grandes saltos de conhecimentos dos processos formadores e deformadores das bacias sedimentares. Em bacias salíferas, diversos trabalhos destacam a importância da geometria herdada do embasamento no controle da halocinese, tanto na escala local quanto na escala regional, reconhecendo a influência do padrão de deformação das camadas acima do sal, durante a translação gravitacional sobre um embasamento rugoso e ou com degraus (Gaullier, 1993; Rowan *et al.*, 1999; Maillard, 2003; Reis *et al.*, 2005; Loncke *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2015). Outros trabalhos, em caráter regional, destacam a influência geométrica (côncava, convexa ou planar) de escarpas na base do sal, nos padrões de espalhamento gravitacional das camadas sedimentares subjacentes (Cobbold & Szatmari, 1991; Demercian, 1996). Na presente dissertação aplicam-se os conceitos formulados pelos já mencionados autores na investigação dos aspectos estruturais que envolveram a fragmentação de uma plataforma carbonática localizada no Alto de Badejo na parte sul da Bacia de Campos, durante um evento de deslizamento gravitacional sobre um substrato rugoso e com protuberâncias na base do sal, onde encontram-se alojadas importantes acumulações petrolíferas.

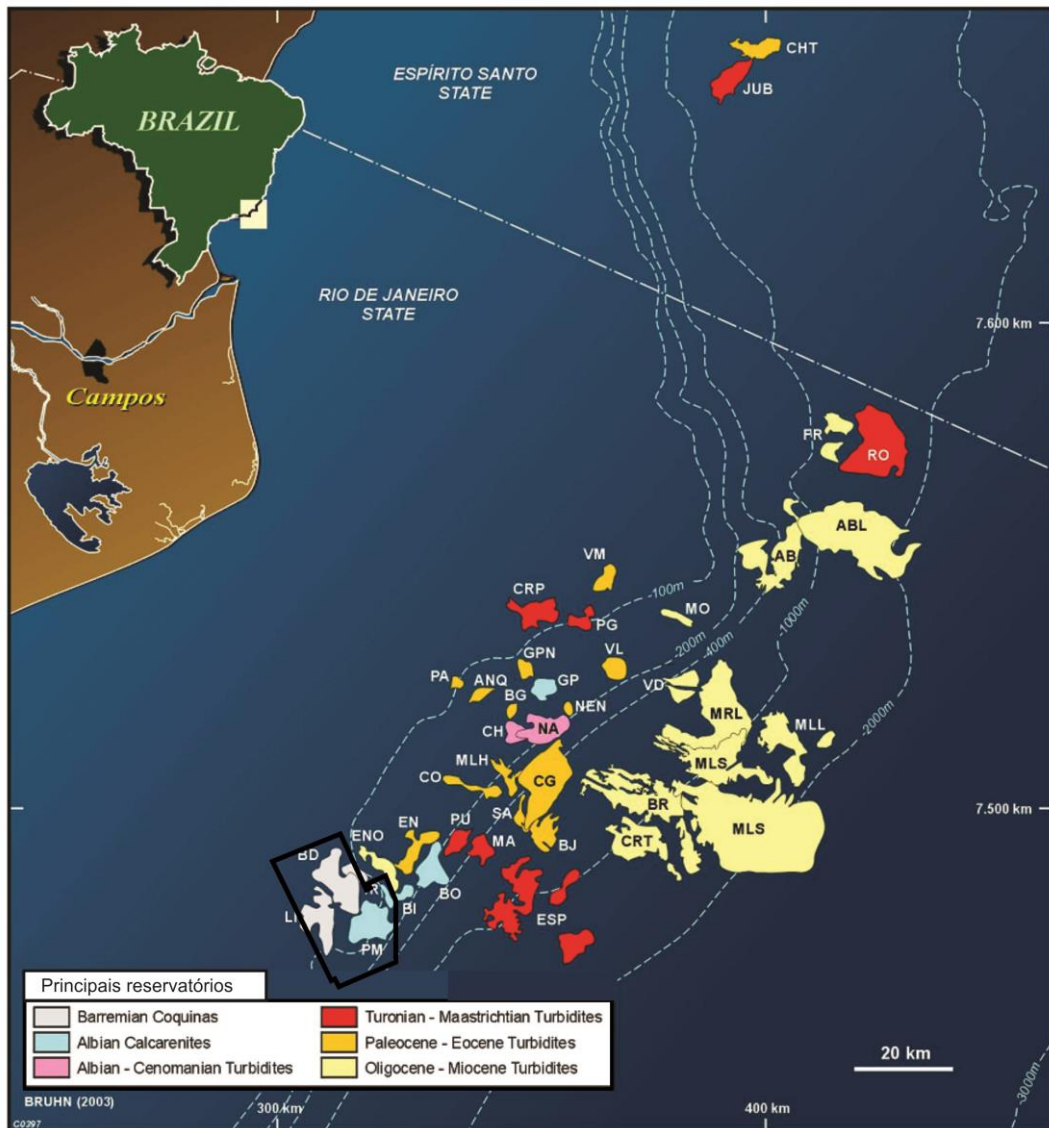
A presente dissertação é composta por 11 Capítulos:

- a) Capítulo 1 - Inclui a proposição do problema, objetivo e a motivação do estudo, definidos no âmbito principal da pesquisa discutida nesta dissertação. É composto também pela localização da área, com uma breve descrição sobre os aspectos geológicos, estruturais e tectônicos da região;
- b) Capítulo 2 - Descreve os materiais utilizados, como dados sísmicos e perfis elétricos de poços;
- c) Capítulo 3 - Descreve a abordagem metodológica utilizada neste estudo;
- d) Capítulo 4 - Apresenta uma contextualização geológica regional da área de interesse;
- e) Capítulo 5 - Descreve os conceitos básicos da tectônica salífera e mostra os principais tipos de estruturas halocinéticas, processos de formação e distribuição destas estruturas, e por fim, lista as principais características das estruturas geradas pela tectônica raft;
- f) Capítulo 6 - Apresenta os principais conceitos e abordagens utilizadas para o processo de balanceamento e restauração de seções e mapas realizados nesta dissertação;
- g) Capítulo 7 - Aborda a geologia estrutural e estratigráfica da área de estudo;
- h) Capítulo 8 - Apresenta os resultados da interpretação sísmica dos horizontes e falhas, os atributos utilizados como base para o mapeamento e uma análise estrutural-estratigráfica dos dados;
- i) Capítulo 9 - Integra os resultados das restaurações estruturais tanto em múltiplas seções quanto em mapa, apresentando os dados quantitativos da deformação desde a idade aptiana (sal) até período recente;
- j) Capítulo 10 - (Este é o principal capítulo da dissertação). Apresenta o modelo de evolução estrutural das plataformas carbonáticas da área, discutindo também a evolução da camada de sal, e a paleobatimetria local;
- k) Capítulo 11 - À luz dos resultados do trabalho, são apresentadas as conclusões retiradas do processo de desenvolvimento desta pesquisa.

1 LEVANTAMENTO DO PROBLEMA, OBJETIVO E MOTIVAÇÃO

Os campos de Linguado e Pampo são acumulações de hidrocarbonetos em rochas carbonáticas albianas, localizadas na porção sul da Bacia de Campos (Figura 1). Integram trapas mistas que produzem desde a década de 80. Estudos referentes à estratigrafia e à sedimentologia para essas acumulações foram feitos por diversos autores entre eles: Baumgarten *et al.*, (1985), Baumgarten & Scuta (1988), Spadini *et al.*, (1988), Horschutz *et al.*, (1992), e sobre a parte estrutural destas trapas, estudos foram feitos, associando as falhas lítricas de crescimento com o controle na distribuição de fácies porosas nas rochas carbonáticas (Figueiredo & Mohriak, 1984; Mohriak *et al.*, 1995).

Figura 1 – Acumulações de hidrocarbonetos na Bacia de Campos.



Legenda: No polígono em preto está a área de estudo. Cada campo está representado pela sigla de referência. Seguindo o sentido de norte indo para sul, FR, Frade; RO, Roncador; AB, Albacora; CHT, Cachalote, MO,

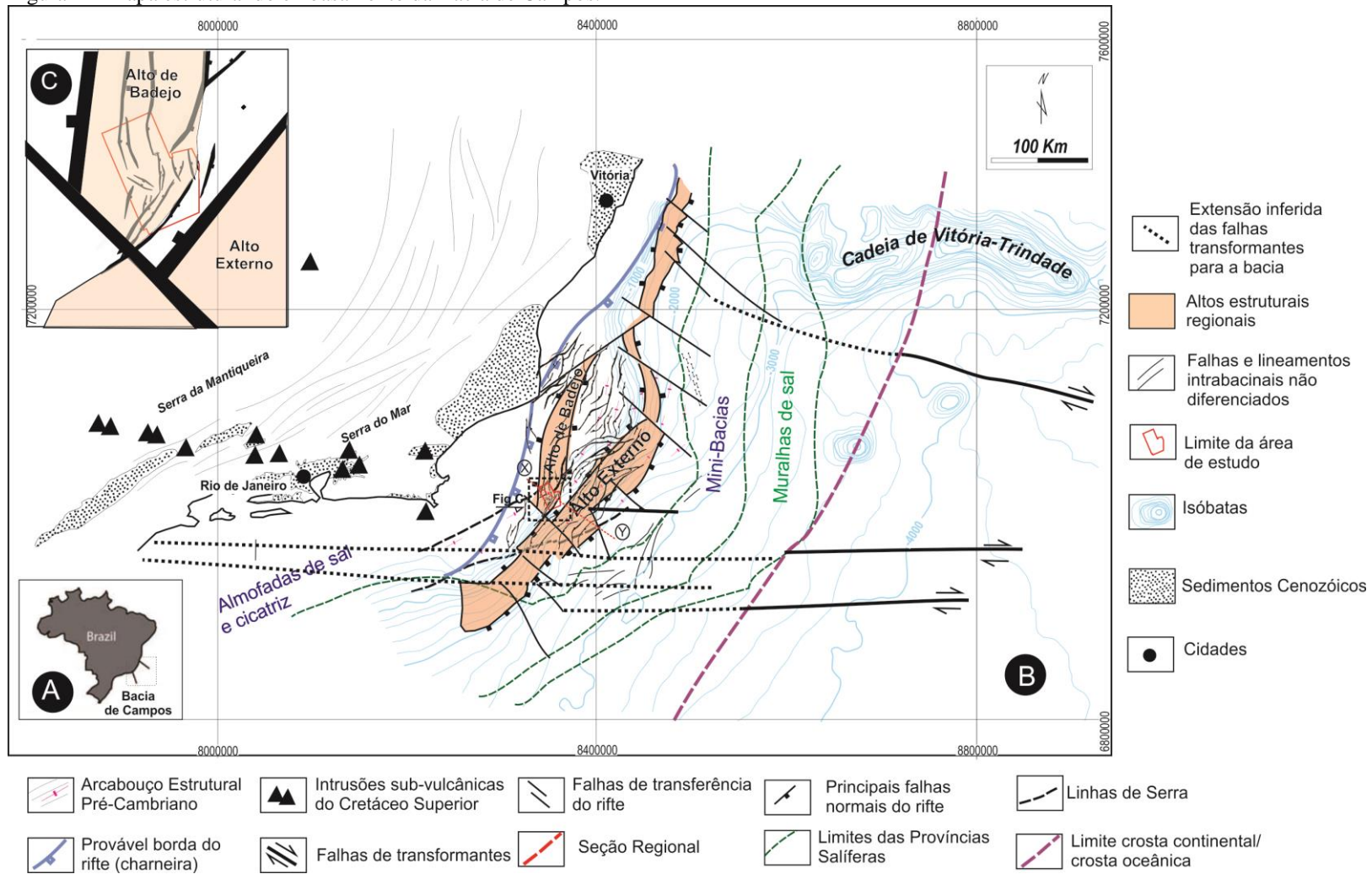
Moréia; VM, Vermelho; CRP, Carapeba; PG, Pargo; VL, Viola; GPN, Garoupinha; PA, Parati; ANQ, Anequim; GP, Garoupa; VD, Voador; MRL, Marlim; MLL, Marlim Leste; MLS, Marlim Sul; NEN, Nordeste de Namorado; CG, Congro; BR, Barracuda; CRT, Caratinga; PU, Piraúna; MA, Marimbá; ESP, Espadarte; BD, Badejo; PM, Pampo e LI, Linguado.

Fonte: Bruhn *et al.* (2003). Adaptada pelo autor, 2017.

Estas acumulações estão localizadas sobre o Alto de Badejo que representa um grande *horst* na bacia, onde na área de estudo, existe uma inflexão em sua direção de NE-SW na parte sul, para estruturas NNE-SW na parte norte (Figura 2). As trapas foram formadas como resultado de uma tectônica salífera dentro de um domínio puramente extensional onde predominou almofadas de sal, *rollers* e cicatrizes de sal.

Recentes levantamentos sísmicos 3D realizados em 2010 permitiram a iluminação de sistemas de falhas pouco estudados nas plataformas carbonáticas albianas da Bacia de Campos. Com a melhoria dos trabalhos de geomecânica, parte dessas falhas foram caracterizadas como selantes, exercendo forte controle nas propriedades permoporosas, especialmente na distribuição de contatos óleo água, regimes de pressão e separação de intervalos produtores (Bruhn *et al.*, 2003). Apesar dos esforços para o entendimento do papel dessas falhas, ainda há uma grande lacuna de conhecimento da trajetória evolutiva dessas estruturas, bem como do seu papel na segmentação de campos de petróleo contíguos. Visando contribuir para o tema pretende-se detalhar a geologia estrutural desse segmento da Bacia de Campos, enfatizando os aspectos que podem ter influenciado na geração dos espaços de acomodação, bem como no desenvolvimento especialmente das trapas que integram as acumulações de hidrocarbonetos de Pampo e Linguado. Um ponto de destaque é a influência da paleogeografia do embasamento na segmentação dessas plataformas carbonáticas.

Figura 2 – Mapa estrutural do embasamento da Bacia de Campos.



Fonte: Relatório Interno Petrobrás: (Mario Neto 2008)

De acordo com Maillard *et al.* (2003), degraus passivos abaixo de deslizamentos gravitacionais salíferos podem afetar o desenvolvimento das estruturas acima do sal durante o deslizamento gravitacional, gerando grabens ou falhas lítricas localizadas principalmente acima ou próximo aos degraus. Em simulações físicas, Dooley *et al.* (2017), mostram que na parte alta dos degraus são amplificados os efeitos de *drag* basal (fricção) durante a movimentação do sal, reduzindo a velocidade de deslocamento na porção superior da estrutura, gerando uma zona de charneira distensiva entre as partes baixas e altas dos degraus.

Os campos de petróleo de Pampo e Linguado parecem reunir feições muito parecidas com as descritas na literatura, tais como falhas do embasamento que atingem a base do sal (são co-lineares em planta), com a formação de encurvamentos opostos ao sentido de movimento das estruturas, e que parecem possuir variações de espessura de sal em regiões com acoplamento e desacoplamento entre as camadas pré e pós sal. Nesse trabalho, a investigação da influência destas geometrias nos processos halocinéticos, no controle estratigráfico dos reservatórios, e no desenvolvimento estrutural das trapas carbonáticas, foi feita por meio de análise estrutural baseada em interpretação de seções sísmicas em conjunto com os dados de poços, seguida da validação e quantificação, utilizando técnicas de restaurações estruturais de múltiplas seções e mapas.

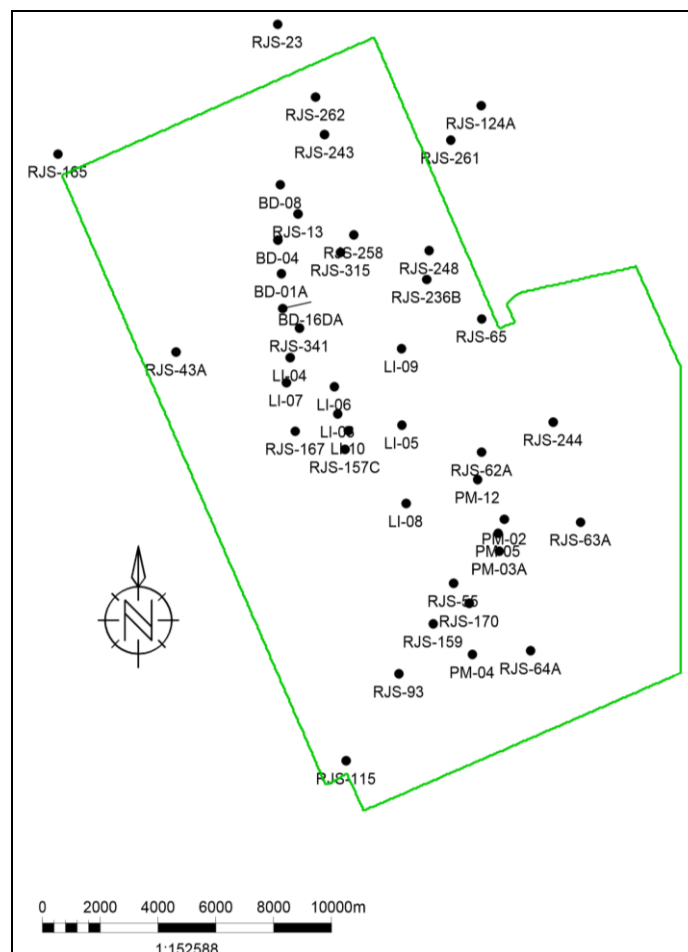
2 MATERIAIS

Este trabalho envolve a análise de dado sísmicos em 3D e de poços localizados na parte sul da Bacia de Campos. O foco principal é a análise estrutural de uma plataforma carbonática albianana deformada por deslizamentos gravitacionais deflagrados por movimentações de uma zona de descolamento nucleada na camada de sal neoptiana. Os movimentos de sal parecem influenciados pela topografia residual do embasamento

2.1 Poços

Para dar suporte a correlação estratigráfica dos horizontes, foram utilizados cerca de quarenta e três poços que perfuraram toda a plataforma carbonática albianana (Figura 3).

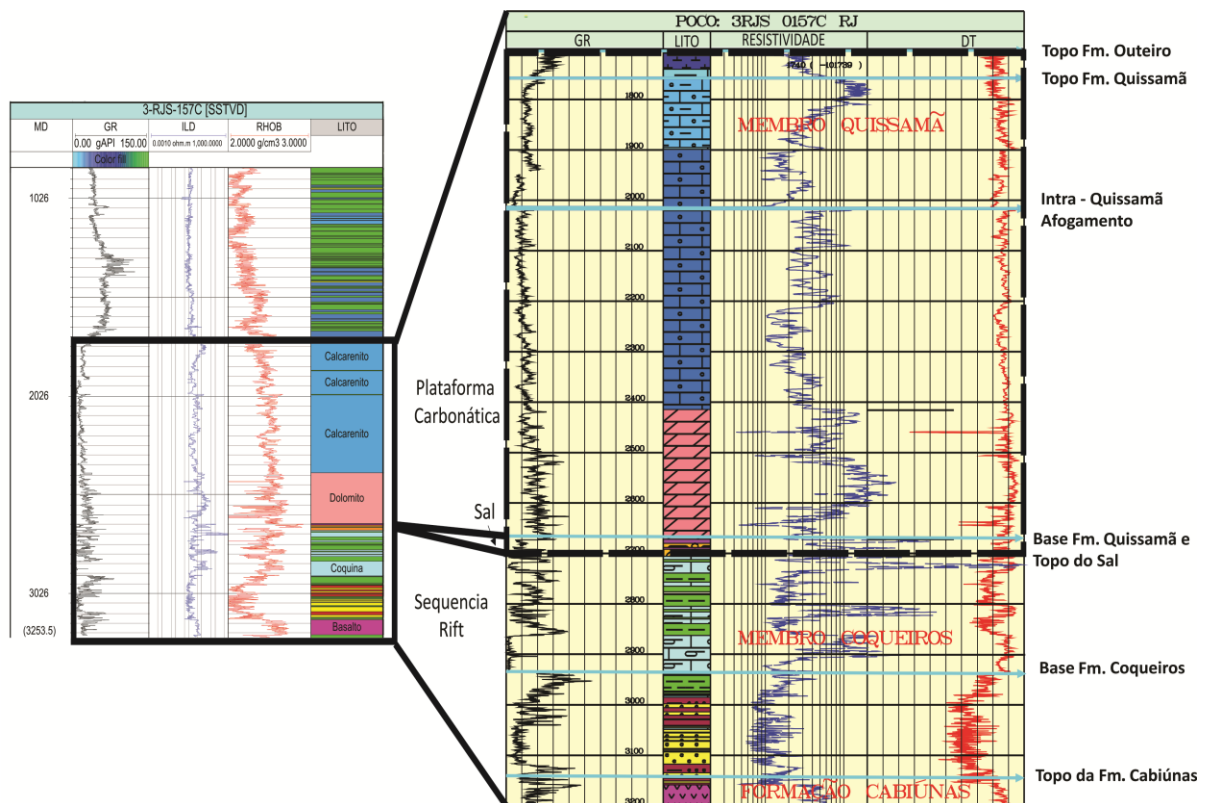
Figura 3 – Poços utilizados para a correlação estratigráfica e amarração sísmica.



Legenda: O polígono em verde representa o limite da área de estudo.
Fonte: O Autor, 2017.

Todos os poços são dotados com perfis elétricos convencionais de GR (*gama ray*), NPHI (*neutron log*), DT (*sonic-acoustic log*), resistividade, incluindo os perfis litológicos, construídos com o auxílio de amostragens laterais e testemunhos, informações estas, que auxiliaram na construção dos modelos geológicos. Na figura 4, é mostrado um perfil típico da área, com os perfis elétricos junto ao perfil litológico, mostrando os marcadores cronoestratigráficos que separam as sequencias rift, evaporítica e a plataforma carbonática.

Figura 4 – Poço com perfil elétrico típico da área



Fonte: O Autor, 2017.

Marcadores bioestratigráficos são presentes em cinco poços, os quais suportaram a construção da curva paleobatimétrica utilizada na reconstrução estrutural.

2.2 Dado sísmico

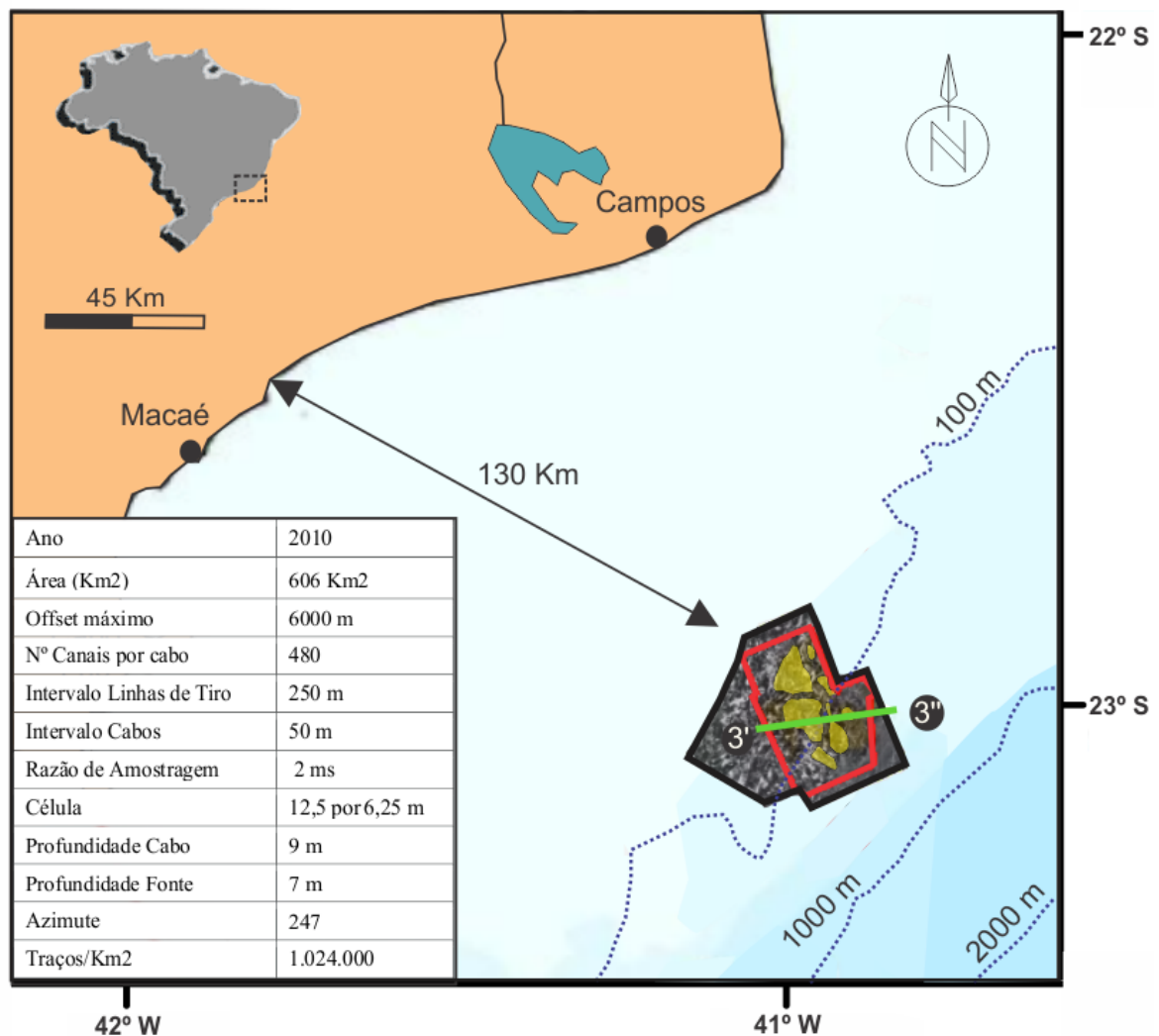
Utilizou-se um levantamento sísmico 3D com 606 Km² (Figura 5), localizado em lamina d'água de 100 m, cobrindo as principais acumulações albianas da área de estudo. O

levantamento sísmico foi adquirido pela empresa *WesternGeco* em 2010, sendo em março de 2013 processado e migrado pré-empilhamento (PSDM) pela empresa *PGS*.

Este dado sísmico também foi utilizado para o mapeamento de 13 horizontes estratigráficos em seção (Figura 6) que individualizaram 12 zonas estratigráficas: 1 - Plioceno, 2 - Mioceno, 3 - Oligoceno, 4 -Eoceno - Paleoceno, 5 - Neocretáceo, 6 - Intra-eocretácio indiviso 7 - Cenomaniano -Neolbiano, 8 – Mesoalbiano, 9 - Eoalbiano, 10 - base do Sal, 11 - base do Aptiano, 12- topo do Neocomiano (Embasamento).

Este cubo também serviu de base para a extração de atributos sísmicos estruturais, e o mapeamento das falhas, que serviram para refinar o arcabouço estrutural da área.

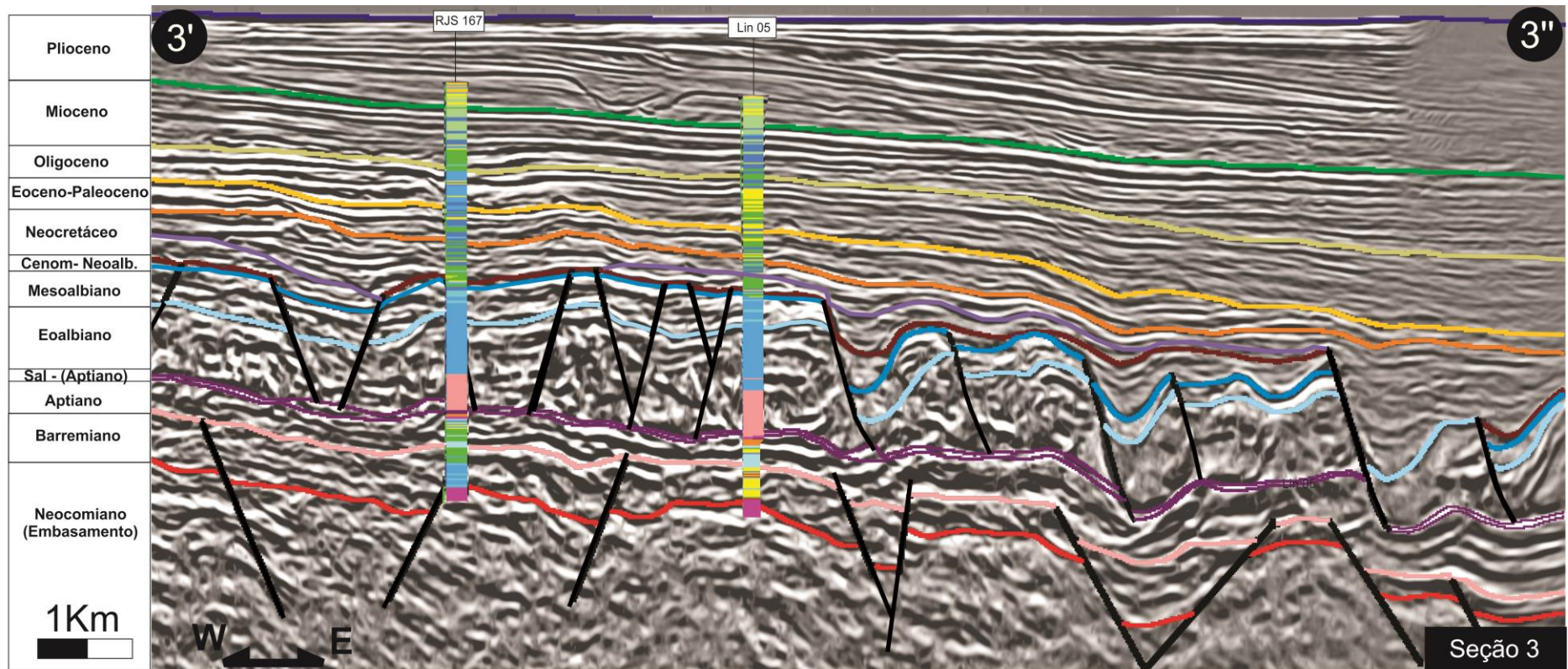
Figura 5 – Área de abrangência e parâmetros de aquisição sísmica utilizados.



Legenda: polígono em preto é o limite do levantamento sísmico de 2010 e em vermelho o limite da área estudada, e em amarelo são os limites das acumulações albianas, a linha verde é uma seção sísmica.

Fonte: O Autor, 2017.

Figura 6 – Seção sísmica leste-oeste em profundidade, mostrando os horizontes sísmicos mapeados ajustados aos dados de poços.



Legenda: Nos poços as cores representam as litologias: em rosa são dolomitos, em azul são carbonatos, em amarelos são arenitos, em verde escuro são folhelhos, e em vinho a base do sal, e na parte basal são os derrames de basaltos. Nota: para a localização vide figura 8.

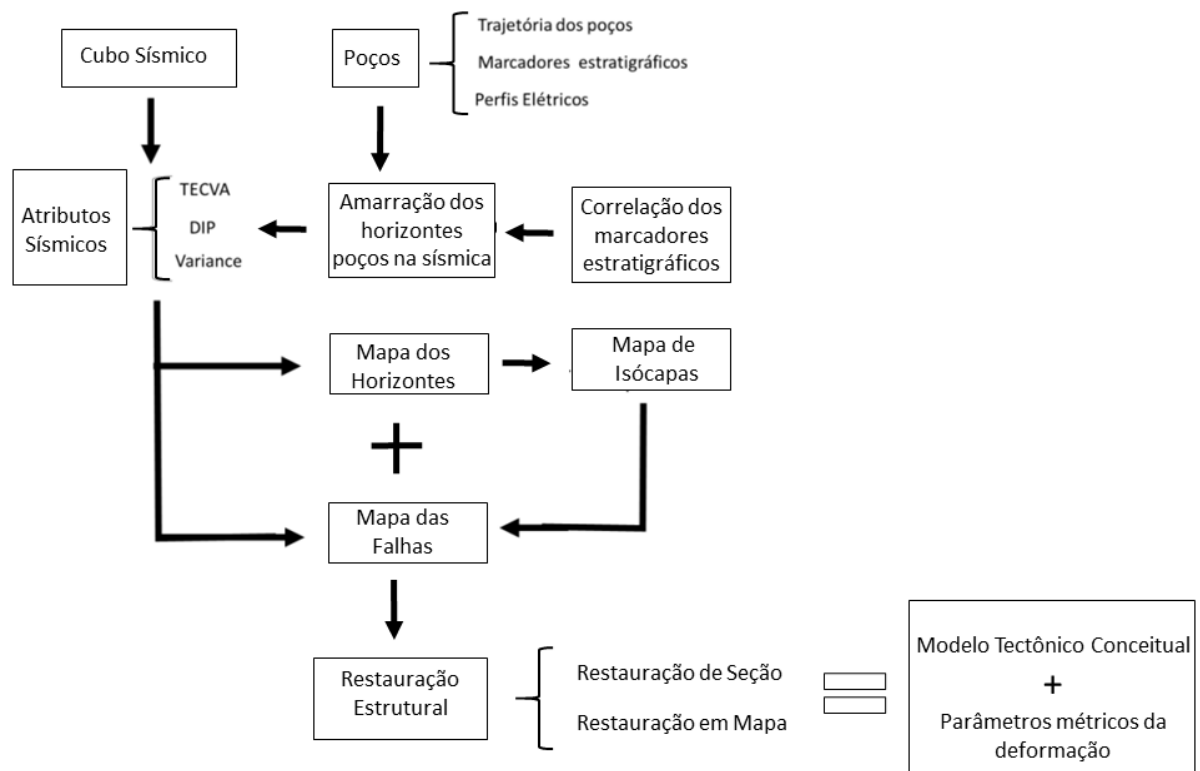
Fonte: O Autor, 2017.

3 METODOLOGIA

3.1 Mapeamento Estrutural

A interpretação sísmica teve o objetivo verificar a compartimentação da área, priorizando o melhoramento do arcabouço de falhas e suas relações com os horizontes sísmicos (superfícies estratigráficas e discordâncias). As informações integradas subsidiaram a investigação dos padrões estruturais e geometrias deposicionais. O mapeamento foi realizado na plataforma Petrel versão 2013 (*Schlumberger*) e o fluxo de trabalho está ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Fluxo de trabalho para a construção do modelo estrutural.



Fonte: O Autor, 2017.

Este fluxo resume-se em:

- a) Carregar os arquivos de trajetória dos poços, perfis elétricos (GR, NPHI, DT), litológicos e os marcos estratigráficos;
- b) Carregamento de cubo sísmico em profundidade;

- c) Correlação dos horizontes nos poços e amarração com os respectivos refletores sísmicos;
- d) Extração de atributos sísmicos estruturais como: TecVa, *Variance* e *Dip*;
- e) Mapeamento dos horizontes, falhas, e confecção de mapas de isópacas;
- f) Restauração estrutural em múltiplas seções;
- g) Restauração estrutural de horizonte em mapa e geração de mapas palinspáticos;
- h) Integração dos dados para a construção de um modelo tectônico conceitual e quantificação dos parâmetros de deformação.

3.2 Restauração em múltiplas seções

O estudo foi feito utilizando o software ReconMs, desenvolvido entre a Tecgraf da PUC-RJ (<http://www.tecgraf.puc-rio.br>) e a Petrobras, usando a tecnologia de modelagem geométrica com uma estrutura de dados topológica simples, e empregando vários tipos de transformações geométricas, como translação e rotação de blocos, cisalhamento simples, além de vários outros, tanto para ambientes distensionais como compressivos.

Algumas premissas básicas usadas na reconstrução estrutural foram:

- a) Princípio da conservação de área, ou seja, não há entrada ou saída de material no plano da seção geológica, com exceção do sal, onde a restauração foi feita de maneira que se preenchessem os espaços vazios criados;
- b) A deformação considerada é puramente planar ou restringida apenas em dois eixos, configurando assim uma deformação em duas dimensões;
- c) Não consideração dos fatores de compensação térmica, pois não foram obtidos parâmetros térmicos consistentes para analisar este efeito;
- d) Foi considerado um completo desacoplamento da camada evaporítica com as sequências inferiores. Esta premissa é devida ao pequeno comprimento das seções, a qual não permite uma análise adequada em escala de bacia, utilizando restaurações estruturais, de modo a investigar os efeitos de

reativações do embasamento, apesar do trabalho de alguns autores como de Fetter (2009) mostrarem este efeito.

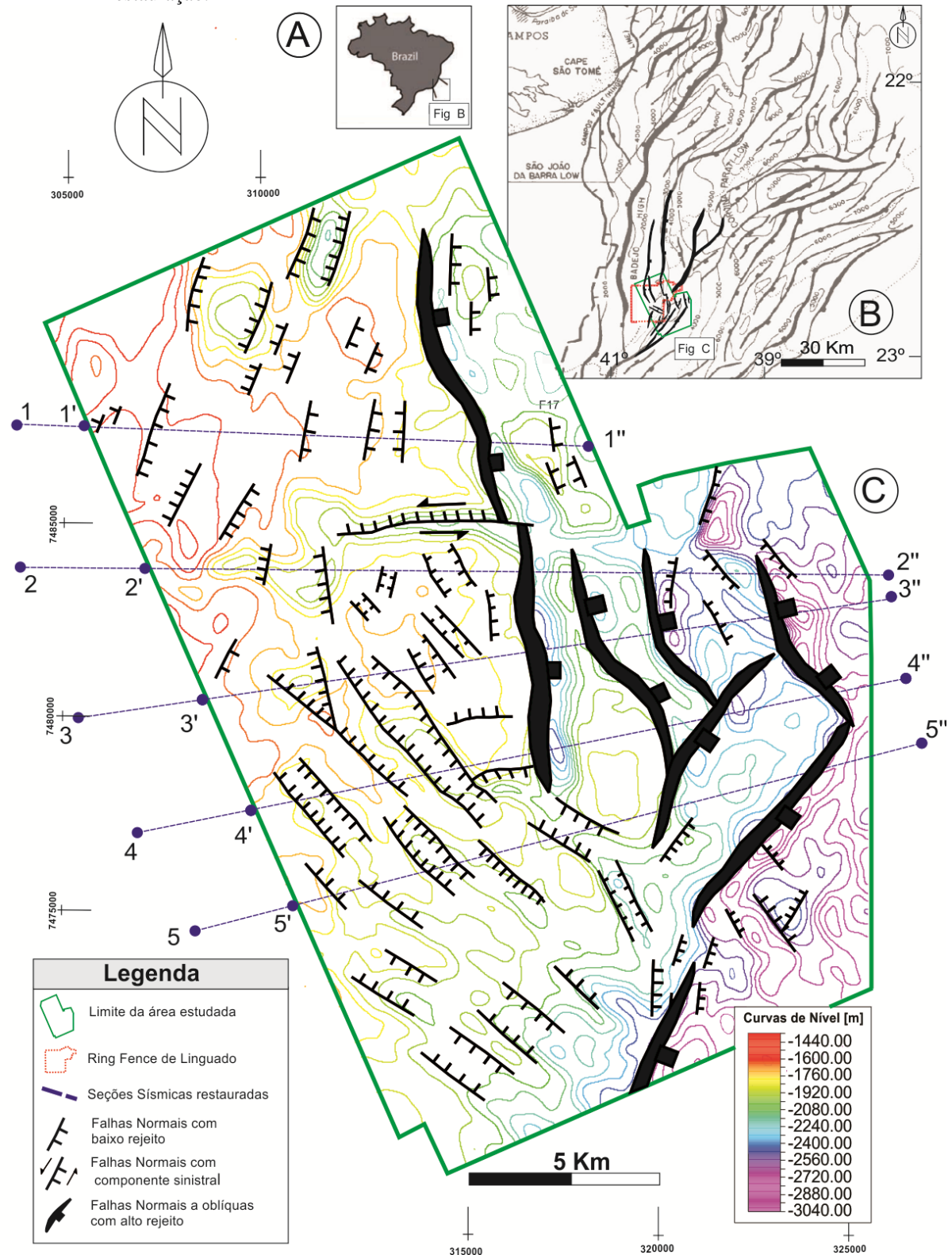
Foram selecionadas cinco seções geológicas em profundidades, (Figura 8), paralelas à direção do principal transporte tectônico, e perpendicular às principais falhas da área e interpretados 13 horizontes estratigráficos. Para a restauração, foram selecionados 10 horizontes da sequência pós-sal para a restauração: (1) Base do Sal, (2) Eoalbiano (3) Mesoalbiano (4) Cenomaniano-Eoalbiano (5) Intra-Neocretáceo (6) Topo do Neocretáceo, (7) Topo do Eoceno, (8) Topo do Oligoceno, (9) Topo do Mioceno e (10) Fundo do mar

As etapas seguidas para cada intervalo na restauração foram: 1 - Descompactar o intervalo de sobrecarga, 2 - Retirar a camada de Sal, 3 - Restaurar as falhas usando os algoritmos do Recon, 4 - Reconstrução das superfícies com a calibração da curva de paleobatimetria 5 - Cisalhamento simples no topo das camadas a fim de restaurar o volume de sal, 6 - Recolocar a camada de sal, repetindo a etapa inicial do processo.

Para as etapas de descompactação, onde existe o processo de expansão vertical das camadas, os dados de densidade e porosidade inicial dos intervalos foram adquiridos a partir do banco de dados do software ReconMS.

Não há interpretação de falhas para as camadas de idade mais novas que o Cretáceo Superior e assim estas foram apenas descompactadas na restauração. Para a restauração dos intervalos falhados, foram utilizados os algoritmos: move sobre falha nas regiões de grábens (com cisalhamento antitético ao longo do plano da falha), move sobre falha com superfícies de descolamento para as falhas lítricas, e cisalhamento simples para o topo das camadas restauradas, e subordinadamente a rotação e a translação.

Figura 8 – Localização da área na margem continental brasileira com as cinco seções sísmicas usadas na restauração.

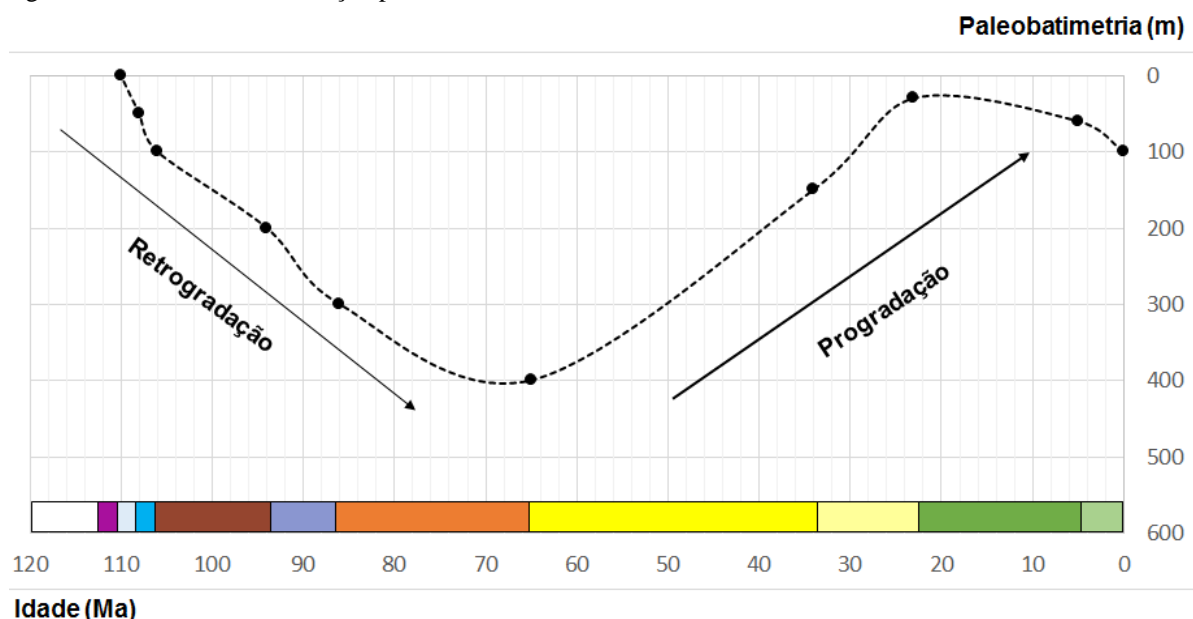


Legenda: A) Localização da área na margem continental brasileira. B) Mapa estrutural regional do embasamento da Bacia de Campos. C) Mapa estrutural do topo do intervalo Cenomaniano-Neobianiano com as cinco seções sísmicas usadas na restauração

Fonte: O Autor, 2017.

Algumas regiões foram bastante erodidas, então foi necessária a reconstrução das camadas, sendo que durante a etapa 4 da restauração, o topo do intervalo foi calibrado com dados de bioestratigrafia, a partir de foraminíferos bentônicos analisados em 4 poços. Esses dados de paleobatimetria são de baixa resolução e apresentam incertezas na ordem de centenas de metros. Para essa calibração, os dados foram agrupados em torno de uma média para cada intervalo estratigráfico, gerando uma curva de evolução paleobatimétrica local (Figura 9). Essa curva foi utilizada de maneira simplificada como parâmetro para restaurar o topo das estruturas, pois foi feita com a compilação de quatro poços o que resultou em uma curva que representa os dados de apenas um poço (Figura 9). Todavia os resultados podem servir como um dado preliminar, passível de refinamentos a medida que novos poços possam ser utilizados. A curva indica que a região desde o Aptiano superior (sal) até o Neocretáceo, se comportou como uma plataforma rasa com até 200 m de profundidade. Do Neocretáceo ao Eoceno ocorreu o aprofundamento da bacia que passou para um ambiente de transição talude superior/plataforma (entre 200 a 400 m), ou seja, em todos os intervalos a inclinação do substrato foi praticamente horizontal.

Figura 9 – Perfil local de evolução paleobatimétrica.

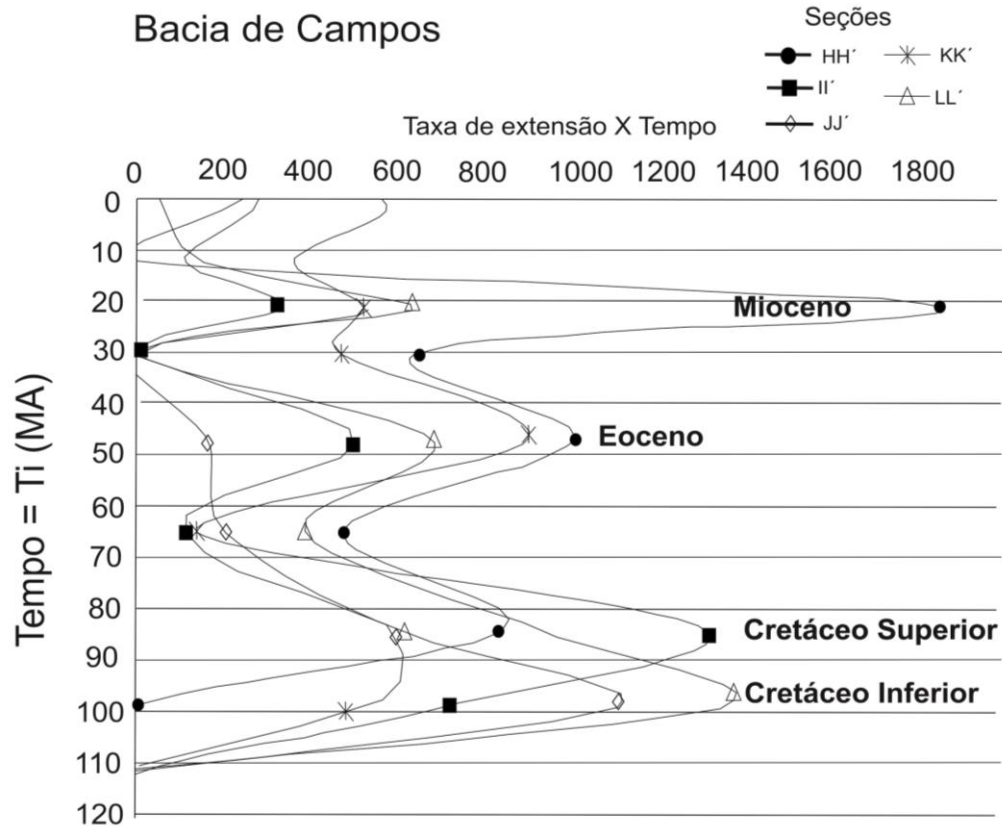


Fonte: O Autor, 2017.

Ao longo da história de abertura da Bacia de Campos, alguns períodos de maior taxa de estiramento são diferenciados (Figura 10) segundo Fetter (2009). Na etapa de restauração estes momentos foram utilizados como base para rotacionar a bacia durante as idades

Mioceno, Eoceno, Cretáceo Superior e Inferior, e assim, atingir um nível de gradiente batimétrico menor que 1% durante a restauração dos horizontes.

Figura 10 – Curva de taxa de extensão versus tempo para cinco seções restauradas na Bacia de Campos



Fonte: Modificada de Fetter, 2009.

As restaurações permitiram quantificar o comprimento original das seções (L_0) e compará-lo com a extensão finita (L_f), utilizando a formulação da alongação horizontal (E_{xx}) (Equação 1A). Também foram calculados os deslocamentos horizontais (d_{xx}) (Equação 1B):

Equação 1. Cálculos da alongação e deslocamento horizontais

$$e_{(xx)} = (L_f - L_0)/L_0 \quad (1A)$$

$e_{(xx)}$ = alongação horizontal

$$d_{(xx)} = L_f - L_0 \quad (1B)$$

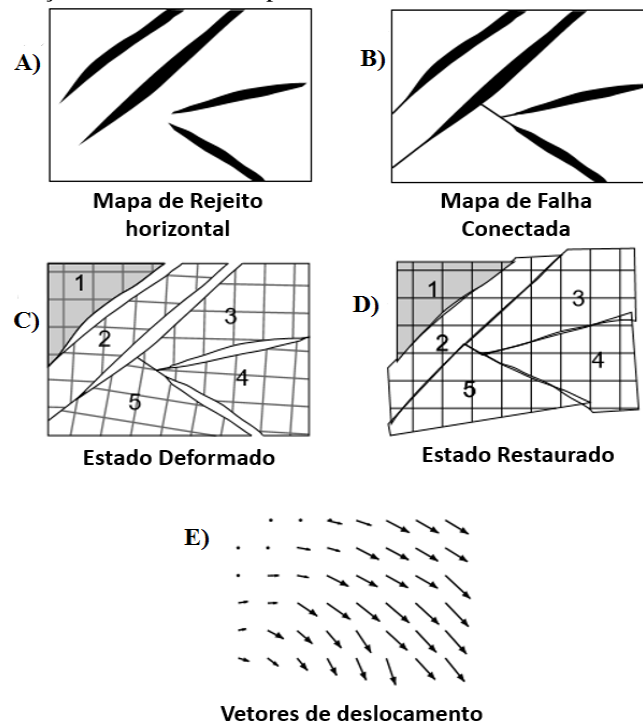
$d_{(xx)}$ = deslocamento horizontal

3.3 Restauração palinspática em mapas

O método baseia-se em uma simplificação do denominado método de *least-square palinspatic restoration* dos trabalhos de Rouby *et al.* (1993) e Rouby *et al.* (1996), o qual por meio do ajuste geométrico procura reconstruir horizontes estratigráficos para o estado não deformado, minimizando ou eliminando os rejeitos horizontais das falhas normais. Esse método procura fechar as lacunas criadas pelo rejeito horizontal das falhas em mapa, com o mínimo de sobreposição de blocos e de lacunas.

Os dados de entrada são mapas que mostram o padrão de falhas e a componente horizontal do rejeito de cada falha, a partir de uma projeção vertical em um plano horizontal da interseção do horizonte com a falha nos blocos baixo e alto (Figura 11A). A fim de se restaurar os rejeitos é necessária a individualização de blocos limitados por falhas, sendo que em algumas regiões pode-se extrapolar as falhas gerando um mapa de falhas conectadas (Figure 11B).

Figura 11 – Etapas da restauração estrutural em mapa.



Legenda A) Mapa de rejeitos horizontais B) Mapa de falhas conectadas C) Estado deformado D) Estado restaurado E) Vetores de deslocamento

Fonte: Rouby *et al.* (1996). Adaptada pelo autor, 2017.

Durante a restauração, quando os rejeitos horizontais são fechados, é necessária a escolha de um bloco estacionário, para onde todos blocos vão ser movimentados. Junto ao bloco estacionário é gerada uma malha interna em cada bloco para permitir a visualização da deformação interna (Figura 11C). Utilizando ou um procedimento numérico (Rouby *et al.*,1993, Rouby *et al.*,1996) ou mesmo um formato manual, a reconstrução completa gera um mapa para o estado restaurado (Figura 11D).

O Mapa de Deslocamento (Figura 11E) é construído conectando as localidades dos pontos formados no centro da malha antes e depois da deformação. A orientação dos vetores deslocamento permite a distinção entre a deformação planar e a não planar (vetores deslocamento paralelos e vetores divergentes, por exemplo) e uma avaliação da influência da gravidade durante a deformação. Permite também a escolha da melhor posição para se orientar as seções de maneira paralela aos vetores deslocamento.

Outros resultados importantes da restauração em mapa são a avaliação dos movimentos relativos, para pontos em cada lado da falha, identificando a natureza do deslocamento (normal, obliquo ou direcional) e a avaliação da quantidade de rotação dos blocos sobre eixo vertical. Com a restauração completa pode-se reavaliar locais onde existem lacunas e ou uma sobreposição de blocos, dando uma ideia sobre a consistência da restauração e a confiança na interpretação.

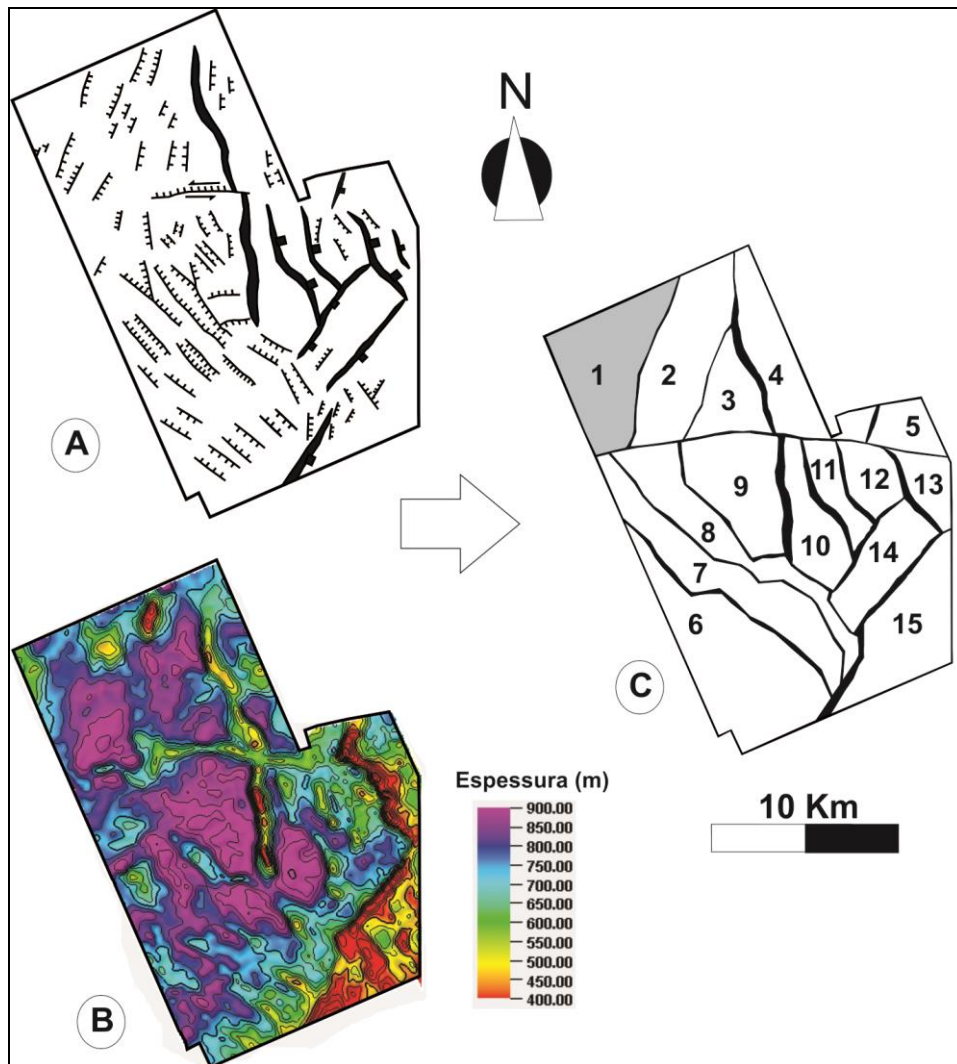
Neste trabalho, a partir dos mapas das falhas das sequencias do pós sal (Figura 12A) e das isópacas da plataforma carbonática (intervalo de idade do Albiano ao Cenomaniano na Figura 12B), utilizado como um balizador para a definição dos blocos nessa etapa da restauração, extrapolou-se as falhas, e se construiu um mapa de falhas conectadas, onde foram separados 15 blocos totalmente circundados por falhas (Figura12C). Algumas falhas foram extrapoladas ao longo do rumo a fim de completar o arranjo segmentado dos blocos.

O mapa de falhas conectados possui os blocos 4 e 5 e 10 a 13, limitados por um grupo das falhas lítricas com direção que varia de N-S a NNW-SSE, e com rejeitos horizontais que podem chegar a valores de 200 metros, valores semelhantes aos que separam os blocos 14 e 15, que são delimitados por falhas lítricas de direção NE-SW. Os blocos de 6 a 8 são limitados por falhas normais planares de direção NW-SE e rejeitos que podem chegar a 100 metros. Os blocos 1 a 3 são limitados por falhas normais planares de direção NE-SW que apresentam rejeitos que podem alcançar dezenas de metros. O bloco 9 apresenta rejeito variável dependendo de qual bloco faz limite e representa o campo de linguado. O bloco 1,

em cinza na figura 11C, foi utilizado como o bloco rígido na restauração, pelo seu caráter proximal e por estar menos deformado. Uma falha normal de direção leste-oeste e com componente direcional, foi extrapolada em toda a área, sendo a mesma responsável por acomodar a movimentação dos blocos.

Como produto final da restauração foi gerado um mapa de rejeitos finitos identificando os vetores de deslocamento por bloco, antes e depois da restauração e um mapa de rotação de blocos que representa a quantidade de rotação de cada bloco rígido sobre um eixo vertical, medido entre o estado restaurado e o deformado através de uma malha no centro do bloco.

Figura 12 – Construção do mapa de falhas conectadas.



Legenda: (A) Mapa de falhas das sequencias de idade pós-sal. (B) Isópacas do intervalo Cenomaniano + Albiano (C) Mapas de falhas conectadas com os 15 blocos no estado deformado.

Fonte: O Autor, 2017.