



Thaís da Silva Sales

Processamento e modelagem bidimensional de dados gravimétricos para investigação do embasamento no compartimento sul da Bacia do Recôncavo

Thaís da Silva Sales

Processamento e modelagem bidimensional de dados gravimétricos para investigação do embasamento no compartimento sul da Bacia do Recôncavo

Projeto Final de Graduação em Geofísica apresentado à Universidade Federal Fluminense como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Geofísica

Universidade Federal Fluminense - UFF

Orientador: Rodrigo Bijani Coorientador: Antônio Fernando Menezes Freire

> Niterói, RJ - Brasil 2018

Thaís da Silva Sales

Processamento e modelagem bidimensional de dados gravimétricos para investigação do embasamento no compartimento sul da Bacia do Recôncavo

Projeto Final de Graduação em Geofísica apresentado à Universidade Federal Fluminense como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Geofísica

Aprovado em 19 de Dezembro de 2018 pelo seguintes avaliadores:

Rodrigo Bijani Orientador - UFF

Antônio Fernando Menezes Freire Co-orientador - UFF

Wagner Moreira Lupinacci Convidado - UFF

> Niterói, RJ - Brasil 2018

Agradecimentos

A realização deste projeto final de graduação contou com a motivação e iniciativa por parte de membros do corpo docente do Instituto de Geociências da Universidade Federal Fluminense, com a disponibilização de dados multigeofísicos pela Agência Nacional do Petróleo e com plataforma gratuita Jupyter Notebook e licenças educacionais (Petrel e Interactive Petrophysics) para manipulação dos dados recebidos. Primeiramente, agradeço ao Departamento de Geologia e Geofísica da Universidade Federal Fluminense pela infraestrutura e ao grupo de Estudos Integrados sobre a Bacia do Recôncavo por fomentar os estudos de métodos potenciais na região e pelos conhecimentos colaborativamente adquiridos e compartilhados. Adicionalmente, agradeço em particular aos professores Fernando Freire, Rodrigo Bijani e Wagner Lupinacci pelos ensinamentos em sala de aula, pela solicitude e pela disponibilidade. Vocês se tornaram meus grande exemplos profissionais e pessoais, acredito que o sucesso dos nossos estudos é resultado da dinâmica horizontal do nosso ambiente de trabalho e a vontade de sempre aprendermos uns com os outros. A minha querida família, que, ainda quando eu era pequena, já vislumbrava um futuro promissor em minha vida. Obrigada por lutarem em prol dos meus estudos, este trabalho é dedicado à força e amor que compartilhamos. Aos amigos sempre presentes, sou grata por acreditarem no meu potencial. Essa força foi essencial para que esta etapa acadêmica fosse cumprida com êxito e alegria. Desejo que este trabalho seja uma fagulha e motive mais pesquisas geocientíficas na região, de forma que a geofísica seja popularizada e receba o reconhecimento merecido. Espero que outros estudantes e pesquisadores sejam inspirados por esse produto gerado com empenho e dedicação.

Resumo

A Bacia do Recôncavo possui uma longa trajetória exploratória, que pode ser traçada com cada vez mais acurácia pelos geocientistas. Um interesse latente em estudos sobre bacias sedimentares consiste em determinar a morfologia do embasamento cristalino por meio da gravimetria. Muitos trabalhos foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas buscando respostas consistentes a respeito deste tema. Neste trabalho, apresenta-se uma modelagem gravimétrica bidimensional por meio de polígonos irregulares para representar o embasamento cristalino da porção emersa da Bacia do Recôncavo (BA). Primeiramente, os vértices do polígono são determinados interativamente pelo usuário do software desenvolvido em linguagem Python 2.0. Em seguida, calcula-se a anomalia Bouguer predita ao considerar os constrastes de densidade variáveis com a profundidade no modelo poligonal. Para tanto, dados gravimétricos da região de interesse foram compilados e fornecidos pela Agência Nacional do Petróleo (ANP). Para que a anomalia Bouguer residual observada fosse obtida e comparada com a anomalia predita pelo modelo poligonal, um ajuste polinomial de grau seis foi considerado e posteriormente removido da anomalia Bouguer total a fim de que a componente residual fosse realçada. Buscando reduzir ambiguidades e consequentemente aprimorar o modelo gravimétrico proposto, foram requeridos, adicionalmente, quatro perfis de poços com informações sobre a densidade sedimentar e duas linhas sísmicas 2D com detalhes sobre a morfologia do embasamento nas proximidades da região de estudo. Dois resultados significativos foram considerados: O modelo 1, construído com base em informações multi geofísicas; e o modelo 2 com base informações geológicas relevantes. O modelo 1 apresentou bom ajuste ao dado observado ao longo de toda a seção. Já o modelo 2 apresenta bom ajuste na porção sudeste da seção gravimétrica, porém é notoriamente incongruente na porção oposta. Conclui-se que esta incongruência é provocada por heterogeneidades na densidade do embasamento, o que resulta em uma anomalia Bouguer mais negativa em uma região estruturalmente elevada.

Palavras-chave: Gravimetria, Bacia do Recôncavo, Modelagem 2D

Abstract

The Recôncavo basin has a large exploration trajectory that can be structured with more acuracy by geocientists nowadays. A smoldering interest in the study of sedimentary basins is to determine basement's morfology through gravimetry. Many studies are been developed during the last decades in order to find consistent answers about this subject. On this study it is presented a bidimensional gravity modelling by irregular polygons that represent the cristaline basement of the emerged portion of Reconcavo basin (BA). Firstly, the polygon vertices are interactively determined by the user on a software developed in Python 2.0. After this step, the predicted Bouguer anomaly is calculated considering that the density contrasts vary in depth on the poligonal model. Thus, gravimetric data on the zone of interest were compiled and offered by National Petroleum Agency (ANP). In order to obtain the residual Bouguer anomaly and compare it with the predicted Bouguer anomaly provided by the modelling method, a polynomial fit were considered and subtracted from the total Bouguer anomaly. Therefore, the residual component of data could be highlighted. With the aim to minimize ambiguities and, consequently, to enhance the gravity modelling, four log profiles with density information and two seismic lines 2D with details about the basement morfology were required. Two significant result were considered: The model 1, based on multi geophysical data; and model 2, based on previous geological information. On one hand, model 1 presented good adjustment all over the section in comparison to the observed data. On the other hand, model 2 showed a good adjust in the southern portion of the gravity section, however its notoriously incongruous in the oposite side. In conclusion, this incongruity is provoked by heterogeneities on the basement density, which results in a negative Bouguer anomaly in a structurally high region.

Keywords — Gravimetry, Recôncavo basin, 2D gravity modeling

Sumário

	Sumário	VI
	Lista de ilustrações	/11
1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
2	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	3
2.1	Sequências sedimentares	5
2.2	Embasamento	8
2.2.1	Afloramentos do embasamento na cidade de Salvador, BA	15
2.3	Geologia estrutural da Bacia do Recôncavo	16
3	GRAVIMETRIA	19
3.1	Fundamentos teóricos	19
3.2	Reduções gravimétricas	20
3.2.1	Redução de Bouguer	23
3.3	Densidade das rochas	25
3.4	Anomalias regional e residual	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1	Processamento dos dados gravimétricos	29
4.1.1	Obtenção da anomalia residual	29
4.1.2	Delimitação da área de estudo	32
4.1.3	Obtenção da seção gravimétrica 2D	33
4.2	Modelagem direta bidimensional	33
4.2.1	Função hiperbólica de densidade	34
4.2.2	Cálculo da anomalia gravimétrica predita	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.1	Resultado Preliminar: Modelo 1	38
5.2	Resultado Final: Modelo 2	40
6	PERSPECTIVAS FUTURAS	45
7	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS	47

Lista de ilustrações

 do Recôncavo, ao longo dos anos (ANP, 2018)	Figura 1 -	– Gráfico da produção de hidrocarbonetos no campo de Massapê, Bacia
 Figura 2 – Arquitetura e principais estruturas da Bacia do Recôncavo (MILHOMEM et al., 2003)		do Recôncavo, ao longo dos anos (ANP, 2018). $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 1$
 et al., 2003)	Figura 2 -	– Arquitetura e principais estruturas da Bacia do Recôncavo (MILHOMEM
 Figura 3 – Esquema ilustrativa para as principais fases de sedimentação da Bacia do Recôncavo. Modificado de Santos, Cupertino e Braga (1990) 4 Figura 4 – Carta estratigráfica da Bacia do Recôncavo (SILVA et al., 2007) 6 Figura 5 – Esboço tectônico da região nordeste do Brasil com destaque para a área de estudo. Província do São Francisco: 1.Bloco de Jequié; 2.Bloco de Serrinha; 3. Geenstone Belt do Rio Itapicuru; 4.Cinturões Móveis Salvador-Curaçá (I) e Salvador-Esplanada (II), Província Borborema:5.Faixa de Dobramentos Sergipana, Bacias Mesozóicas: 6. Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá (Bacias: Jatobá-j, Tucano Norte-tn, Tucano Central-tc, Tucano Sul-ts, Recôncavo-r); 7. Bacias de Sergipe (I) e Camamu(II), 8.Área do projeto, 9.Contatos, 10. Cavalgamentos e empurrões, 11. Falhas trans- 		et al., 2003)
 do Recôncavo. Modificado de Santos, Cupertino e Braga (1990) 4 Figura 4 – Carta estratigráfica da Bacia do Recôncavo (SILVA et al., 2007) 6 Figura 5 – Esboço tectônico da região nordeste do Brasil com destaque para a área de estudo. Província do São Francisco: 1.Bloco de Jequié; 2.Bloco de Serrinha; 3. Geenstone Belt do Rio Itapicuru; 4.Cinturões Móveis Salvador-Curaçá (I) e Salvador-Esplanada (II), Província Borborema:5.Faixa de Dobramentos Sergipana, Bacias Mesozóicas: 6. Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá (Bacias: Jatobá-j, Tucano Norte-tn, Tucano Central-tc, Tucano Sul-ts, Recôncavo-r); 7. Bacias de Sergipe (I) e Camamu(II), 8.Área do projeto, 9.Contatos, 10. Cavalgamentos e empurrões, 11. Falhas trans- 	Figura 3 -	– Esquema ilustrativa para as principais fases de sedimentação da Bacia
 Figura 4 – Carta estratigráfica da Bacia do Recôncavo (SILVA et al., 2007)		do Recôncavo. Modificado de Santos, Cupertino e Braga (1990) 4
 Figura 5 – Esboço tectônico da região nordeste do Brasil com destaque para a área de estudo. Província do São Francisco: 1.Bloco de Jequié; 2.Bloco de Serrinha; 3. Geenstone Belt do Rio Itapicuru; 4.Cinturões Móveis Salvador-Curaçá (I) e Salvador-Esplanada (II), Província Borborema:5.Faixa de Dobramentos Sergipana, Bacias Mesozóicas: 6. Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá (Bacias: Jatobá-j, Tucano Norte-tn, Tucano Central-tc, Tucano Sul-ts, Recôncavo-r); 7. Bacias de Sergipe (I) e Camamu(II), 8.Área do projeto, 9.Contatos, 10. Cavalgamentos e empurrões, 11. Falhas trans- 	Figura 4 -	– Carta estratigráfica da Bacia do Recôncavo (SILVA et al., 2007) 6
de estudo. Província do São Francisco: 1.Bloco de Jequié; 2.Bloco de Ser- rinha; 3. Geenstone Belt do Rio Itapicuru; 4.Cinturões Móveis Salvador- Curaçá (I) e Salvador-Esplanada (II), Província Borborema:5.Faixa de Dobramentos Sergipana, Bacias Mesozóicas: 6. Rifte Recôncavo-Tucano- Jatobá (Bacias: Jatobá-j, Tucano Norte-tn, Tucano Central-tc, Tucano Sul-ts, Recôncavo-r); 7. Bacias de Sergipe (I) e Camamu(II), 8.Área do projeto, 9.Contatos, 10. Cavalgamentos e empurrões, 11. Falhas trans-	Figura 5 -	– Esboço tectônico da região nordeste do Brasil com destaque para a área
rinha; 3. Geenstone Belt do Rio Itapicuru; 4.Cinturões Móveis Salvador- Curaçá (I) e Salvador-Esplanada (II), Província Borborema:5.Faixa de Dobramentos Sergipana, Bacias Mesozóicas: 6. Rifte Recôncavo-Tucano- Jatobá (Bacias: Jatobá-j, Tucano Norte-tn, Tucano Central-tc, Tucano Sul-ts, Recôncavo-r); 7. Bacias de Sergipe (I) e Camamu(II), 8.Área do projeto, 9.Contatos, 10. Cavalgamentos e empurrões, 11. Falhas trans-		de estudo. Província do São Francisco: 1.Bloco de Jequié; 2.Bloco de Ser-
Curaçá (I) e Salvador-Esplanada (II), Província Borborema:5.Faixa de Dobramentos Sergipana, Bacias Mesozóicas: 6. Rifte Recôncavo-Tucano- Jatobá (Bacias: Jatobá-j, Tucano Norte-tn, Tucano Central-tc, Tucano Sul-ts, Recôncavo-r); 7. Bacias de Sergipe (I) e Camamu(II), 8.Área do projeto, 9.Contatos, 10. Cavalgamentos e empurrões, 11. Falhas trans-		rinha; 3. Geenstone Belt do Rio Itapicuru; 4.Cinturões Móveis Salvador-
Dobramentos Sergipana, Bacias Mesozóicas: 6. Rifte Recôncavo-Tucano- Jatobá (Bacias: Jatobá-j, Tucano Norte-tn, Tucano Central-tc, Tucano Sul-ts, Recôncavo-r); 7. Bacias de Sergipe (I) e Camamu(II), 8.Área do projeto, 9.Contatos, 10. Cavalgamentos e empurrões, 11. Falhas trans-		Curaçá (I) e Salvador-Esplanada (II), Província Borborema:5.Faixa de
Jatobá (Bacias: Jatobá-j, Tucano Norte-tn, Tucano Central-tc, Tucano Sul-ts, Recôncavo-r); 7. Bacias de Sergipe (I) e Camamu(II), 8.Área do projeto, 9.Contatos, 10. Cavalgamentos e empurrões, 11. Falhas trans-		Dobramentos Sergipana, Bacias Mesozóicas: 6. Rifte Recôncavo-Tucano-
Sul-ts, Recôncavo-r); 7. Bacias de Sergipe (I) e Camamu(II), 8.Área do projeto, 9.Contatos, 10. Cavalgamentos e empurrões, 11. Falhas trans-		Jatobá (Bacias: Jatobá-j, Tucano Norte-tn, Tucano Central-tc, Tucano
projeto, 9.Contatos, 10. Cavalgamentos e empurrões, 11. Falhas trans-		Sul-ts, Recôncavo-r); 7. Bacias de Sergipe (I) e Camamu(II), 8. Área do
a manta a /tana afananta 19 Ealle a nama is 19 I in ann antas astrutura is		projeto, 9.Contatos, 10. Cavalgamentos e empurrões, 11. Falhas trans-
correntes/transferentes, 12.Fainas normais, 15.Lineamentos estruturais,		correntes/transferentes, 12.Falhas normais, 13.Lineamentos estruturais,
avb-Arco do Vaza Barris, ap-Alto de Aporá, lp-Lineamento de Pernam-		avb-Arco do Vaza Barris, ap-Alto de Aporá, lp-Lineamento de Pernam-
buco, Falhas:Ibimirim (fib): São Saité (fss): Adustina (fa):Inhambupe		buco, Falhas:Ibimirim (fib): São Saité (fss): Adustina (fa):Inhambupe
(fin): Salvador (fs) e Maragogipe (fm). Modificado de Guimarães (2002). 9		(fin): Salvador (fs) e Maragogipe (fm). Modificado de Guimarães (2002). 9
Figura 6 – Esboco do cenário paleogeográfico do Neoproterozóico, precedendo as	Figura 6 -	 Esboco do cenário paleogeográfico do Neoproterozóico, precedendo as
principais orogêneses, placas e micro-placas, AM = Amazônia: SL-WA =	0	principais orogêneses, placas e micro-placas, AM = Amazônia: SL-WA =
São Luís– África: PR = Parnaíba: SFCKA = São Francisco–Congo–Kasai–Angola:		São Luís– África: PR = Parnaíba: SFCKA = São Francisco–Congo–Kasai–Angola:
KH = Kalahari: PP = Paranapanema: LA = Luís Alves-Serra Negra:		KH = Kalahari: PP = Paranapanema: LA = Luís Alves-Serra Negra:
RP = Rio de La Plata: PA = Pâmpia: AA = Areguipa-Antofalla. Em		RP = Rio de La Plata; PA = Pâmpia; AA = Areguipa-Antofalla, Em
preto, as principais bacias oceânicas e os diversos bracos de oceanos:		preto, as principais bacias oceânicas e os diversos bracos de oceanos:
A/D – Rockelides–Goianides: B = Farusiano: C = Perifransciscano: E =		A/D – Rockelides–Goianides: B = Farusiano: C = Perifransciscano: E =
Adamastor: $F = Arabe-Nubiano ou ANEKT.$ (SCHOBBENHAUS: NEVES.		Adamastor: $F = Arabe-Nubiano ou ANEKT.$ (SCHOBBENHAUS: NEVES.
2003)		2003)
Figura 7 – Modelo geológico simplificado da porção sul da Bacia do Becôncavo	Figura 7 -	 Modelo geológico simplificado da porção sul da Bacia do Recôncavo
(BARBOSA et al. 2005) 13	i iguia i	(BARBOSA et al. 2005) 13
Figura 8 – Afloramento dos litotipos encontrados na cidade de Salvador, BA, A-	Figura 8 -	 Afloramento dos litotipos encontrados na cidade de Salvador. BA. A-
dique metamórfico associado com metamonzo-sienogranito: B- parte	1 18010 0	dique metamórfico associado com metamonzo-sienogranito: B- parte
indeformado do conjunto A mostrando mistura heterogênea de magma		indeformado do conjunto A mostrando mistura heterogênea de magma
basáltico e granítico: C- dique metamórfico e metamonzo-sienogranito		basáltico e granítico: C- dique metamórfico e metamonzo-sienogranito
deformados: D- dique metamórfico vetical cortando rochas granulíticas		deformados: D- dique metamórfico vetical cortando rochas granulíticas
Modificado de Barbosa et al. (2005) 16		Modificado de Barbosa et al (2005) 16

Figura	9 –	Arcabouço estrutural da Bacia do Recôncavo (MAGNAVITA; SILVA; SAN- CHES, 2005).	17
Figura	10 -	- Gravidade observada em uma falésia com exagero topográfico. Modifi-	0.1
		cado de LaFehr e Nabighian (2012)	21
Figura	11 -	- Modelos de compensação isostática apresentados por $Airy(A)$ e $Pratt(B)$.	22
	10	Modificado de LaFehr e Nabighian (2012)	23
Figura	12 -	- Ilustração do plato e da calota de Bouguer (CARREIRA, 2015)	24
Figura	13 -	- Densidade de rochas comuns. Modificado de LaFehr e Nabighian (2012).	26
Figura	14 -	- Contraste de densidade entre camadas em quilogramas por metro cúbico.	~ -
	- -	Modificado de LaFehr e Nabighian (2012)	27
Figura	15 -	- (a) Visualização gráfica da distribuição dos dados gravimetricos recebi-	
		dos da ANP e (b) zoom na Bacia do Reconcavo, incluindo informações	00
	10	dos poços, linhas sismicas e campos de produção da região	28
Figura	16 -	- Anomalia regional obtida com polinômios e as respectivas anomalias	
		residuais resultantes. Em (a) e (b): Grau 4; em (c) e (d): Grau 5; em	0.1
		(e) e (f): Grau 6 e em (g) e (h): Grau 7. \dots	31
Figura	17 -	(a) Visualização da anomalia Bouguer residual na Bacia do Reconcavo	22
	10	e (b) recorte da area de estudo.	32
Figura	18 -	- Visualização gráfica da área de estudo e localização do perfil selecionado.	33
Figura	19 -	- Fluxograma ilustrativo para elucidar os processos realizados.	36
Figura	20 -	- Perfis de densidade obtidos nos poços I-NRR-1 e 7CX-96D.	37
Figura	21 -	- Interpretação do embasamento nas linhas sísmicas em tempo e suas	
		respectivas localizações na área de estudo.	38
Figura	22 -	- Resultados obtidos através da modelagem com base em dados multi	~ ~
			39
Figura	23 -	- Seção geológica na região de estudo. Modificado de Penteado (1999).	40
Figura	24 -	- Mapa estrutural do topo do embasamento na Bacia do Recôncavo (SILVA,	
		2006)	41
Figura	25 -	- Resultados obtidos através da modelagem com base em informações	
		geológicas a priori	42
Figura	26 -	- Interpretação geológica baseada no segundo modelo gerado e informações	
		geológicas a priori.	43

1 Introdução

1.1 Motivação

A Bacia do Recôncavo está situada no estado da Bahia, no Brasil e é a área de exploração mais antiga do país. Em 1939, o primeiro poço regulamentado foi implantado no bairro Lobato, em Salvador, e então as possibilidades exploratórias na região se evidenciaram. Esta descoberta possibilitou a produção comercial de petróleo no Brasil, em 1941, através do campo de Candeias, ativo até os dias atuais. A bacia é classificada como madura por conta do grau de exploração e produção de hidrocarbonetos e compreende 21 blocos exploratórios com 79 campos em produção e desenvolvimento.

A Agência Nacional do Petróleo (ANP) afirma que a quantidade de produção de petróleo e gás natural na bacia em setembro de 2018 foi de 28.353 bbl/dia e 1.984 Mm³/dia, respectivamente. Todavia, estes valores são baixos em comparação com as primeiras décadas de produção.

A Figura 1 evidencia que mesmo nesse contexto de queda, existe grande possibilidade de recuperar a produtividade em uma bacia há muito explorada, como é evidenciado no panorama do ano de 2004 para o campo de Massapê, importante região de produção na Bacia do Recôncavo. Acredita-se que avanços tecnológicos e maiores investimentos em pesquisas científicas otimizem o processo ao passo que novos alvos são investigados e determinados.



Figura 1 – Gráfico da produção de hidrocarbonetos no campo de Massapê, Bacia do Recôncavo, ao longo dos anos (ANP, 2018).

A necessidade em compreender esta região de grande interesse econômico motiva pesquisas cada vez mais aprofundadas sobre suas características geológicas e geofísicas. Como parte do projeto de Estudos Integrados sobre a bacia desenvolvido no departamento de Geologia e Geofísica da Universidade Federal Fluminense (UFF), surge o interesse em investigar a morfologia do embasamento regional e a possível influência do relevo na escolha de alvos exploratórios e campos de produção. Além disso, é de grande interesse científico e industrial o entendimento da dinâmica e atuação das principais feições estruturais em estudos que tenham por objetivo otimizar e ampliar a produção de petróleo nos campos exploratórios situados na região baiana.

A gravimetria é um método geofísico potencial utilizado na indústria de E&P para identificação de anomalias provocadas pelo contraste de densidade entre rochas em subsuperfície. Este trabalho portanto consiste na análise qualitativa e quantitativa dos dados recebidos por intermédio do BDEP - ANP, através de visualizações gráficas e delimitação da área de estudo; processamento dos dados para obtenção da anomalia residual e consequente realce das estruturas geológicas que compõem o embasamento; e, finalmente, na modelagem direta dos dados gravimétricos em seção gerada através de vínculo com dados multi geofísicos e informações geológicas a priori.

A manipulação dos dados gravimétricos foi realizada através de códigos em *Python* 2.0 e os principais parâmetros utilizados foram destacados ao longo do texto. Este estudo almeja estabelecer um modelo de embasamento e preenchimento da bacia sedimentar que melhor se adéque aos dados observados em campo. Através da comparação visual entre os dados observados e os dados calculados resultantes da modelagem gravimétrica bidimensional proposta por Rao, Chakravarthi e Raju (1994), a morfologia do embasamento no compartimento sul da Bacia do Recôncavo será investigada e correlacionada com a compreensão geológica do local.

2 Contexto geológico regional

A Bacia do Recôncavo ocupa uma área de aproximadamente 12.000 Km², com orientação principal NE-SW. Sua origem está associada à abertura do Atlântico Sul, evento geotectônico que ocorreu durante o Eocretáceo, resultado da fragmentação do supercontinente Gondwana. Silva et al. (2007) indica que o regime tectônico distensivo instaurado produziu um aulacógeno, cuja parte sul representa a Bacia do Recôncavo.

Esta feição geológica se estende de uma área orogênica e vai de encontro à área cratônica e tem por características evolutivas subsidência profunda de longa duração, além de sedimentação espessa, favorável ao acúmulo de hidrocarbonetos (WINGE et al., 2018). A bacia é limitada a norte e a noroeste pelo Alto do Aporá, a sul pelo sistema de falhas da Barra, a leste pelo sistema de falhas de Salvador e a oeste pela falha de Maragogipe (Figura 2). A arquitetura da bacia é de hemi-gráben, com mergulho à leste, onde as camadas sedimentares se espessam e, consequentemente, onde se encontram os maiores depocentros da bacia sedimentar (SILVA et al., 2007).



Figura 2 – Arquitetura e principais estruturas da Bacia do Recôncavo (MILHOMEM et al., 2003).

Este braço que não desenvolveu crosta oceânica na abertura do Atlântico foi preenchido por pacotes sedimentares que datam desde o Permiano até o Neógeno e que diferem em ambiente de sedimentação, condições climáticas e atividade tectônica atuante no período de deposição. Portanto, para melhor compreensão da evolução sedimentar da bacia as fases de sedimentação foram divididas em Andar Rio da Serra, Andar Aratu e Andar Buracica, que serão discutidos a seguir (Figura 3).



Figura 3 – Esquema ilustrativa para as principais fases de sedimentação da Bacia do Recôncavo. Modificado de Santos, Cupertino e Braga (1990).

Andar Rio da Serra:

Caracterizado por altas taxas de subsidência que originou um ambiente lacustre e, posteriormente, deltáico. Nesta fase foram depositados o Membro Gomo, principal complexo de rochas geradoras da bacia do Recôncavo; a Formação Maracangalha, que apresenta fácies gravitacionais de talude definidas como os Membros Pitanga e Caruaçu, ambos depósitos turbidíticos, sendo o primeiro classificado litologicamente como arenitos fechados e o segundo como arenitos melhor selecionados, devido a característica paleoambiental de franja deltaica que o define (GUERRA; BORGUI, 2003). O padrão progradante da sedimentação evidencia uma mudança no ambiente, que dá lugar aos depósitos deltáicos agrupados na Formação Pojuca (NETTO; OLIVEIRA, 1985), controlada estruturalmente por falhas de crescimento e processos de argilocinese.

Andar Aratu:

Esta fase deposicional tem por característica principal a implantação de cânions com orientação SW-S na bacia. Bueno (1987) argumenta que a reativação da falha Paranaguá

causou rebaixamento no nível de base bacinal, desencadeando no preenchimento sedimentar da base erosional do cânion. A formação Taquipe compreende este preenchimento e registra depósitos de folhelho cinza e arenitos finos com registro de estratificação e paleofauna (ostracodes). Ainda, a compartimentação estrutural da bacia do Recôncavo por intermédio de falhas transcorrentes ocorre ao final do Andar Aratu (NETTO; OLIVEIRA, 1985).

Andar Buracica:

Equivalente ao preenchimento dos baixos regionais, como o Baixo de Alagoinhas, este Andar é caracterizado pela ciclicidade de ambientes de sedimentação, que transitam entre fluvial, deltáico e lacustre (SANTOS, 2005), o que evidencia um regime progradacional no período de sua ocorrência. De acordo com Santos (2005), as variações climáticas são de grande importância na sedimentação durante este período, cujos registros encontram-se no Grupo Massacará, de fácies fluvial progradante.

2.1 Sequências sedimentares

De acordo com Silva et al. (2007), o rifteamento atuante na região da Bacia do Recôncavo entre o Mesojurássico e o Cretáceo Inferior se divide em estágios tectônicos que impactama sedimentação na área. Portanto, serão descritas as supersequências sedimentares de acordo com o período geológico e consequente fase tectônica que a bacia foi submetida.



Figura 4 – Carta estratigráfica da Bacia do Recôncavo (SILVA et al., 2007).

• Supersequência Pré-Rifte

Os depósitos sedimentares anteriores a formação da bacia compreendem a Formação Afligidos, que remonta um paleoclima árido derivado de um regime transgressivo do Paleozóico. Esta fase deposicional registra sedimentações de ambientes sedimentares distintos sendo estes os ambientes marinho raso, lacustre restrito do tipo *sabkha* e, por fim, o ambiente predominantemente lacustre nas áreas distais da margem continental. A Formação Afligidos é sub-dividida no Membro Pedrão, cuja litologia é definida por arenitos, lamitos algais e evaporitos; e no Membro Cazumba, formado por pelitos e lamitos lacustres.

A fase pré-rifte marca o estágio inicial de flexura da bacia e é composta pelas Formações Aliança, Sergi, Água Grande e Itaparica. As formações Sergi e Água Grande são reconhecidas como importantes reservatórios de hidrocarbonetos na bacia e marcam um período transicional da Bacia do Recôncavo para um ambiente sedimentar predominantemente lacustre (SILVA et al., 2007). Estas formações representam ciclos fluvio-eólicos separados por transgressões lacustres que se depositaram na então depressão Afro-Brasileira (PONTE et al., 1971), na qual um lago fora instaurado no momento de flexura inicial da bacia sedimentar.

A Formação Sergi apresenta litologia arenítica e seus altos índices de porosidade e permeabilidade justificam o volume inicial de 362 milhões de m³ de óleo *in place* (BONGIOLO; SCHERER, 2010) estimados para esta formação. Já a Formação Água Grande foi depositada sob clima árido, em um contexto de planície aluvial extensa, precedente ao tectonismo intenso da fase rifte. São arenitos quartzosos com boa permo-porosidade e diferenciação em fácies fluvial e eólica da base para o topo da formação (WIEDERKEHR, 2008).

• Sequência Rifte

O início da fase rifte é marcado por duas fases deposicionais importantes: a primeira é caracterizada pelo grande controle tectônico na deposição, enquanto a segunda é elucidada por uma transgressão regional associada à taxas de subsidência mais elevadas na bacia (NETTO; OLIVEIRA, 1985). As formações compreendidas nesse período são Candeias, Maracangalha, Marfim, São Sebastião e Salvador.

A Formação Candeias se divide nos Membros Tauá e Gomo, este último caracterizado por depósitos turbidíticos que evidenciam o aprofundamento da bacia do Recôncavo.

A Formação Maracangalha, por sua vez, registra os fluxos gravitacionais de talude que preenchem a bacia com os sedimentos dos Membros Caruaçu e Pitanga. Silva et al. (2007) interpreta que a sobrecarga de sedimentos do Membro Caruaçu é o gatilho para a deformação plástica de sedimentos argilosos em algumas regiões da bacia. Este processo denominado argilocinese é responsável por falhamentos lístricos sin-deposicionais no arcabouço estrutural e demarca o encerramento da fase de expansão da bacia.

A Formação Marfim representa depósitos lacustres e contém o Membro Catu. A Formação São Sebastião, mais jovem, compreende depósitos fluviais que evidenciam o fim do assoreamento do rifte, visto que os ambientes deposicionais se tornam cada vez mais interioranos ao continente (SANTOS, 2005).

Por fim, a Formação Salvador apresenta fácies conglomeráticas sin-tectônicas na borda de falha da bacia e está interdigitada por depósitos originados na fase rifte.

• Sequência Pós-Rifte

A fase pós-tectônica é caracterizada por sistemas aluviais de deposição que são produto da subsidência termal subsequente ao rifteamento. A Formação Marizal faz parte dessa sequência e apresenta litologia clástica grossa, além de folhelhos e calcários. No Neógeno, o regime transgressivo foi o principal agente controlador da sedimentação da Formação Sabiá (folhelhos esverdeados e calcários impuros) e do Grupo Barreiras (depósitos de leque aluvial).

2.2 Embasamento

A Bacia do Recôncavo está situada sobre o Cráton de São Francisco, de cerca de 2.0 bilhões de anos (ALKIMIN, 1993). Faixas móveis como os Cinturões Salvador-Itabuna-Curaçá e Salvador-Esplanada, o Bloco Serrinha, além de rochas metassedimentares compreendidas no Grupo Estância compõem o embasamento cristalino sob a bacia estudada (GUIMARÃES, 2002), o que sugere uma complexidade nas características geológicas e físicas destes elementos geotectônicos (Figura 5). Estas estruturas do embasamento se acomodam em relação às outras através de colagens e atuam como zonas de fraqueza em atividades tectônicas posteriores.



Figura 5 – Esboço tectônico da região nordeste do Brasil com destaque para a área de estudo. Província do São Francisco: 1.Bloco de Jequié; 2.Bloco de Serrinha; 3. Geenstone Belt do Rio Itapicuru; 4.Cinturões Móveis Salvador-Curaçá (I) e Salvador-Esplanada (II), Província Borborema:5.Faixa de Dobramentos Sergipana, Bacias Mesozóicas: 6. Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá (Bacias: Jatobá-j, Tucano Norte-tn, Tucano Central-tc, Tucano Sul-ts, Recôncavo-r); 7. Bacias de Sergipe (I) e Camamu(II), 8.Área do projeto, 9.Contatos, 10. Cavalgamentos e empurrões, 11. Falhas transcorrentes/transferentes, 12.Falhas normais, 13.Line-amentos estruturais, avb-Arco do Vaza Barris, ap-Alto de Aporá, lp-Lineamento de Pernambuco, Falhas:Ibimirim (fib); São Saité (fss); Adustina (fa);Inhambupe (fin); Salvador (fs) e Maragogipe (fm). Modificado de Guimarães (2002).

De acordo com Neves (1995), os crátons são regiões plataformais consolidadas através de construções e regenerações de faixas móveis e apresentam a tríplice composta por estabilidade relativa, antiguidade e transitoriedade, além de espessura litosférica representativa e baixa atividade térmica. Ainda, é definido que a estrutura e estratigrafia dos crátons possui os estágios de embasamento e cobertura sedimentar. Segundo o autor, estas características destacam as áreas cratônicas e as diferenciam de regiões com alta taxa de atividade tectônica. De forma geral, considera-se que a litologia dos crátons é composta por rochas metamórficas de médio e alto grau que geralmente abrigam rochas intrusivas resultantes de eventos geológicos posteriores.

• Evolução continental da porção nordeste da plataforma Sul-americana

A formação da placa continental Sul-americana tem sido discutida por geocientistas ao longo das últimas décadas, cada vez mais pautada por argumentos técnicos advindos dos avanços tecnológicos em áreas como gravimetria, sísmica, paleomagnetismo e geocronologia. Há indícios e forte discussão de que a movimentação de placas continentais, ocasionada pela tração de sobrecarga da placa em subducção (OKAYA et al., 2007), ocorre continuamente e culminou em fusões de continentes de forma frequente após o Arqueano (NEVES, 1995).



Figura 6 – Esboço do cenário paleogeográfico do Neoproterozóico, precedendo as principais orogêneses, placas e micro-placas. AM = Amazônia; SL-WA = São Luís-África; PR = Parnaíba; SFCKA = São Francisco-Congo-Kasai-Angola; KH = Kalahari; PP = Paranapanema; LA = Luís Alves-Serra Negra; RP = Rio de La Plata; PA = Pâmpia; AA = Arequipa-Antofalla. Em preto, as principais bacias oceânicas e os diversos braços de oceanos: A/D - Rockelides-Goianides; B = Farusiano; C = Perifransciscano; E = Adamastor; F = Árabe-Nubiano ou ANEKT. (SCHOBBENHAUS; NEVES, 2003)

De acordo com Schobbenhaus e Neves (2003), no Paleoproterozóico, o supercontinente Rodínia se consolidou através de colagens orogênicas sucessivas de massas continentais menores, tal qual a porção São Francisco. As orogenias na plataforma Sulamericana permaneceram até o Meso-proterozóico, quando as massas continentais do globo, por fim, se aglutinaram (Figura 6).

No entanto, no Neoproterozóico, se iniciou a fissão do supercontinente Rodínia, momento de tectonismo ativo, produtor de uma gama de elementos tectônicos registrados nos ambientes bacinais ocasionados pela tafrogênese (SCHOBBENHAUS; NEVES, 2003). Nesta era geológica (1000 Ma a 541 Ma), a porção continental São Francisco, juntamente com as porções Gabão, Kasai e Angola integrava um bloco litosférico oriundo dos esforços extensionais, também responsáveis por múltiplos regimes de margem passiva no globo. Na paleo-geografia deste bloco litosférico, a porção São Francisco foi uma península majoritariamente submersa, o que possibilitou um ambiente específico para os registros de processos sedimentares que ocorreram neste contexto. Ainda no Neoproterozóico, o movimento das demais massas continentais converge para o bloco São Francisco-Gabão-Kasai-Angola (SFGKA), que se tornou uma área estável frente aos movimentos colisionais contemporâneos que se intensificaram nas bordas e deram origem ao supercontinente Gondwana.

Por fim, o bloco SFGKA estabilizou-se em um contexto multicolisional e distensional. Devido ao caráter regional das investigações geocientíficas, foi batizado como Cráton São Francisco.

• Cráton São Francisco

O Cráton São Francisco ocupa uma área expressiva no território brasileiro com cerca de $650.000.000 \text{ Km}^2$, o que o situa geograficamente sobre todo o estado da Bahia e partes dos estados de Goiás, Pernambuco e Minas Gerais.

A estabilização do cráton ocorreu em momentos distintos devido à diferenciação de eventos tectônicos na região. Altamente retrabalhado durante o ciclo geodinâmico Transamazônico (2, 26 Ga a 1, 86 Ga – (WINGE et al., 2018)), os terrenos cratônicos registram intrusões graníticas e depósitos de minérios ferrígenos nas zonas de borda (ALMEIDA et al., 1977). Regiões no interior do cráton, entretanto, apresentam idades Brasilianas (950 Ma a 490 Ma - (WINGE et al., 2018)). A porção baiana deste complexo tectônico é seccionado em rochas metamórficas da facíes granulito-anfibolito que se estendem do Sul a Sudoeste representam o orógeno, de direção N-S, Itabuna-Salvador-Curaçá; a norte situam-se os blocos Arqueanos Gavião e Serrinha; e sob a Bacia sedimentar do Recôncavo se situa o Cinturão Salvador-Esplanada, que se estende praticamente a 45° a norte. (Figura 7).



Figura 7 – Modelo geológico simplificado da porção sul da Bacia do Recôncavo (BARBOSA et al., 2005)

• Bloco Serrinha:

Segmento de crosta com litologia granítica e *greenstone* que se consolidou ao fim do Ciclo Transamazônico. Se localiza na parte norte do Cráton São Francisco. Afirma-se que o período Transamazônico compreendeu um momento orogênico no Bloco Serrinha desencadeado pela tectônica distensiva seguido por colisão e rifteamento ao qual o terreno estava submetido (RIOS et al., 2009), o que influencia diretamente na característica das rochas do terreno. É limitado pelo Cinturão móvel Salvador-Curaçá e pelas rochas sedimentares depositadas no rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá (GUIMARÃES, 2002).

Estes segmentos graníticos são resultado de diversas intrusões plutônicas em crosta antiga e as principais registros são (i) gnaisses e TTG plútons que datam aproximadamente 3.2 a 2.9 Ga; (ii) plútons calc-alcalinos originados antes da atividade tectônica de cerca de 2.15 Ga; e (iii) plútons de origem pós-tectônica de aproximadamente 2.10 Ga (RIOS et al., 2009).

Os segmentos de greenstone belts, por sua vez, tem orientação E-W e NW-SE, sua litologia é definida por rochas metavulcano-sedimentares, com unidades máficas, félsicas e metassedimentares. O surgimento de fácies greenstone é associado ao intenso metamorfismo em fácies xisto verde ao qual as rochas do Bloco Serrinha foram submetidas.

• Cobertura Estância:

Este grupo é considerado parte da faixa de dobramentos Sergipana, região orogênica desenvolvida durante o Ciclo Brasiliano (950 Ma a 550 Ma), evento geodinâmico e diacrônico que resultou na Tafrogênese Toniana. É notável que esta cobertura é a porção mais jovem do embasamento da Bacia do Recôncavo, todavia sua extensão na área e suas características litológicas a tornam objeto imprescindível no estudo da evolução e estrutura da bacia.

As principais litofácies que constituem a Cobertura Estância se dividem nas formações Juetê, Acauã e Lagarto de idade Neoproterozóica. Oliveira et al. (2006) discorre sobre a estratigrafia da Cobertura Estância, detalhando as formações constituintes, da base para o topo. Os autores afirmam que a formação Juetê compreende arenitos e argilitos depositados em ambiente fluvial; a formação Acauã apresenta dolomitos e carbonatos, originados em regime transgressivo, que possibilitou a expansão de domínios marinhos rasos favoráveis à implantação de plataformas carbonáticas; e , finalmente a formação Lagarto, que abarca arenitos e siltitos derivados de sedimentação terrígena de ambientes transicionais altamente influenciada pela dinâmica marinha.

• Cinturão Móvel Salvador-Curaçá:

Estrutura que compreende rochas altamente metamorfizadas e corpos intrusivos, originadas na colisão entre os Blocos Mairi e Serrinha durante o Paleoproterozóico (PA-DILHA; MELO, 1991) e que expressam uma tectônica de cisalhamento dúctil, resultante de eventos tectônicos em fases transcorrentes características da evolução e estruturação regional do Cinturão Salvador-Curaçá.

As rochas metamórficas são agrupadas em uma suíte máfica/ultramáfica denominada por Teixeira (1997) como São José do Jacuípe (SSJ), com largura média de 10 Km, além de complexos ígneos vulcânicos e metassedimentares Caraíba e Ipirá, respectivamente. A litologia da SSJ é diversificada, composta por peridotitos, piroxenitos e também ferrogabros e gabronoritos, o que resulta em mineralogia predominantemente plagioclástica. Ainda, o autor propõe que esta suíte metamórfica tem origem oceânica, devido a aspectos litológicos e faciológicos a ela associados. Os corpos intrusivos componentes do Cinturão Móvel Salvador-Curaçá são definidos por diversos geocientistas (TEIXEIRA, 1997; MELO, 1991) como produto do tectonismo Transamazônico e destacam os momentos de deformação, fusão e cisalhamento crustal.

• Cinturão Salvador-Esplanada:

Formado por gnaisses e migmatitos de médio e alto grau, de idade Arqueana e Paleoproterozóica, é limitado por faixas cisalhantes orientadas à nordeste-sudoeste. De acordo com Rios et al. (2009), este cinturão é limitado pelas bacias sedimentares de Tucano Sul (à norte) e Recôncavo (à sul), o que o torna componente integrante do embasamento da área de estudo. Junior (1990) em Rios et al. (2009) associa as deformações do Cinturão ao Ciclo Transamazônico, mesmo evento geotectônico que modificou as rochas do Cinturão Salvador-Curaçá, o que evidencia para diversos autores (SOUZA-OLIVEIRA et al., 2014; SILVA et al., 2002) a correlação genética entre as duas estruturas, consequência do extenso orógeno colisional do Ciclo Transamazônico.

As zonas de cisalhamento que limitam o Cinturão separam suas diferentes litologias, o que gera uma distribuição diferencial e faciológica no Cinturão Salvador-Esplanada. Na região ocidental concentram-se ortognaisses migmáticos, rochas provenientes de granitos que sofreram fusão parcial *in situ*, enquanto ortognaisses bimodais se distribuem na região oriental. De forma geral, considera-se que o segmento Salvador-Esplanada é constituído por migmatitos, gnaisses, granitóides e granulitos (SOUZA-OLIVEIRA et al., 2014).

2.2.1 Afloramentos do embasamento na cidade de Salvador, BA

O Cinturão Salvador-Esplanada na cidade de Salvador apresenta afloramentos investigados e classificados através de vários mapeamentos geológicos. Dentre as principais rochas analisadas, encontrou-se, majoritariamente, fácies granulito, cortadas por diques máficos e granitóides (BARBOSA et al., 2005). As pesquisas que foram conduzidas extensivamente na região indicam que a evolução destes terrenos se deu de forma complexa, o que originou um conjunto de litotipos metamórficos de alto grau, deformados em momentos e contextos distintos (FUJIMORI, 1988).

Estudos conduzidos por (BARBOSA et al., 2005) na cidade de Salvador, Bahia, investigaram a diferenciação do Alto de Salvador, seccionado pela Falha de Iguatemi. Observou-se a diferenciação de fácies granulito e anfibolito, sendo o primeiro encontrado majoritariamente a oeste e o segundo, a leste da falha. Em visita aos afloramentos da região, encontrou=-se uma variedade de rochas, sendo essas rochas metamórficas paraderivadas e ortoderivadas, diques máficos e monzo-sienogranitos (Figura 8).



Figura 8 – Afloramento dos litotipos encontrados na cidade de Salvador, BA. A- dique metamórfico associado com metamonzo-sienogranito; B- parte indeformado do conjunto A mostrando mistura heterogênea de magma basáltico e granítico; Cdique metamórfico e metamonzo-sienogranito deformados; D- dique metamórfico vetical cortando rochas granulíticas. Modificado de Barbosa et al. (2005).

2.3 Geologia estrutural da Bacia do Recôncavo

A evolução tectônica da bacia do Recôncavo apresenta episódios importantes, com intensa influência de reativações e surgimento de falhas de alívio e de transferência responsáveis pelo controle da sedimentação e arquitetura da região. A atividade das falhas comandou os fluxos de sedimento e a compartimentação dos depocentros da bacia, o que torna sua compreensão essencial para o estudo detalhado dos terrenos que serão reativados por intermédio destas feições estruturais exibidas na Figura 9.



Figura 9 – Arcabouço estrutural da Bacia do Recôncavo (MAGNAVITA; SILVA; SANCHES, 2005).

O eixo principal da bacia tem orientação NNE-SSW e é segmentado transversalmente pela atuação de falhas de transferência (MAGNAVITA; SILVA; SANCHES, 2005) que controlam a espessura e as fácies sedimentares no rifte e que, ademais, são responsáveis pela mudança de vergência do hemi-gráben.

A borda de falha da bacia está a sudeste (falha de Salvador), sendo responsável pela assimetria do gráben e possui grandes rejeitos. Já a borda flexural é limitada pelo Alto de Aporá. De forma geral, a bacia do Recôncavo apresenta falhas normais, tanto sintéticas como antitéticas (MAGNAVITA; SILVA; SANCHES, 2005; MAGNAVITA; SILVA, 1995) e também importantes falhas de alívio (DESTRO et al., 2003). Estas atuam como zonas de acomodação para o rejeito do bloco soerguido e apresentam correlação estrutural com os falhamentos normais. Estes blocos são movimentados pela falha principal de Salvador, com deslocamento que atinge 6000 metros de profundidade.

Destro et al. (2003) afirmam que falhas de alívio são o resultado do *stress* ao qual o bloco soerguido é submetido e geralmente têm direção perpendicular ao *strike* do sistema de falhas normais. Ocorrem individualmente, de forma que não conectam blocos submetidos à diferentes movimentos tectônicos. Na bacia estudada, a falha de Mata-Catu exemplifica a dinâmica das falhas de alívio, assim como um grupo de outras falhas, de menor escala (DESTRO et al., 2003). Estas falhas também influenciam na movimentação dos baixos estruturais da bacia, sendo os mais conhecidos o Baixo de Camaçari e o Baixo de Alagoinhas. Esta relação foi evidenciada através de estudos gravimétricos realizados na região e interpretados por Destro et al. (2003).

A falha de Mata-Catu é de grande relevância para compreensão dos sistemas petrolíferos da Bacia do Recôncavo, uma das bacias mais prolíficas do país (ANP, 2018; MAGNAVITA; SILVA; SANCHES, 2005). Diversos autores (MAGNAVITA; SILVA; SANCHES, 2005; DESTRO et al., 2003) afirmam que esta zona de alívio atua como rota migratória e também trapa de hidrocarbonetos oriundos dos membros Tauá e Gomo, na Formação Candeias, ramificando os reservatórios para diferentes pontos da bacia sedimentar.

3 Gravimetria

O uso da gravimetria tem sido evidenciado e sua importância aumenta em diversos ramos das geociências. A distribuição de anomalias do geóide, por exemplo, são calculadas com dados gravimétricos e, dessa forma, atua como informação complementar no estudo evolutivo da litosfera, com ênfase em descoberta de jazidas de recursos naturais (LAFEHR; NABIGHIAN, 2012; TELFORD et al., 1990; NETTLETON, 1971).

O levantamento gravimétrico investiga, particularmente para fins exploratórios, as variações do campo gravitacional da Terra provocadas pela diferença de densidade das rochas em subsuperfície. Teoricamente, estas variações de densidade acontecem horizontalmente e são provocadas por perturbações nas camadas plano-paralelas de densidades diferentes. Estas perturbações estruturais são o motivo para que um contraste de densidade seja gerado (NETTLETON, 1971).

Segundo Kearey, Brooks e Hill (2009), as anomalias gravimétricas locais são provocadas por uma fonte ou corpo causador que possui propriedades físicas que contrastam com as propriedades da rocha circundante. Nettleton (1971), por sua vez, acrescenta a importância das estruturas que se desenvolvem na coluna geológica (falhas, intrusões entre outras) para o desenvolvimento de contrastes de densidade.

As diferenças de densidade resultantes deste processo, então, evidenciam situações geológicas de interesse que podem ser interpretadas como bacias sedimentares, domos de sal ou relevos do embasamento, de acordo com a escala de visualização e resolução da gravimetria. A interpretação dos dados gravimétricos adquiridos traz informações sobre a profundidade e a forma da fonte causadora e, consequentemente, a compreensão do ambiente geológico associado.

3.1 Fundamentos teóricos

A gravimetria se baseia fundamentalmente na lei da gravitação de Newton, cuja expressão pode ser enunciada a seguir (BLAKELY, 1996):

$$\overrightarrow{F} = \frac{GMm}{R^2}\hat{r},\tag{3.1}$$

onde F representa a força gravitacional, de característica atrativa, G é a constante universal de gravitação, M e m são as massas dos corpos que interagem e R é a distância entre eles. A equação 3.1 afirma que a magnitude da força gravitacional entre duas massas é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. De forma simplificada, nota-se que a força gravitacional se relaciona com a massa através de uma aceleração, conhecida como aceleração gravitacional. Essa relação traduz satisfatoriamente a interação entre a Terra e os corpos de massa que nela se encontram. Todavia, devido à heterogeneidade do planeta, a magnitude da aceleração gravitacional é variável e está associada, dentre outros fatores, a forma elipsoidal da Terra, sua rotação, irregularidades no relevo superficial e também pela distribuição diferencial interna das massas (NETTLETON, 1971).

3.2 Reduções gravimétricas

Os dados de gravimetria adquiridos em campo devem ser submetidos a diferentes reduções, com o intuito de corrigí-los de acordo com o objetivo ao qual se destinam. As reduções aplicadas aos dados observados realçam suas variações, que são classificadas como anomalias gravimétricas. O cálculo dessas anomalias se inicia na seguinte expressão:

$$\Delta g = g_0 - g_r. \tag{3.2}$$

A diferença entre a aceleração da gravidade observada g_0 , composta pelos efeitos causados pela massa rochosa, e os diversos ruídos g_r , que representam os fatores indesejados, resulta no módulo da anomalia observada (LAFEHR; NABIGHIAN, 2012).

O estudo realizado na Bacia do Recôncavo conta com levantamentos gravimétricos aéreos e terrestres, logo, as reduções mais importantes para estas aquisições serão descritas a seguir em ordem de aplicabilidade.

• Deriva Instrumental

Por conta de modificações físicas nos componentes do equipamento, as medidas são afetadas de forma linear ou errática, o que depende do equipamento utilizado e seu tempo de uso, tempo e número de leituras obtidas e material que o compõe. Para minimizar os efeitos da deriva instrumental, pode-se utilizar uma estação base como referencial, a qual se visita periodicamente ao longo da expedição para verificação das diferenças nas medidas obtidas com o equipamento (LAFEHR; NABIGHIAN, 2012).

• Efeito de maré

As marés afetam as leituras gravimétricas por conta da sua variação temporal, que são influenciadas pelas posições do Sol e da Lua em relação às estações gravimétricas. A variação da gravidade causada pelo efeito das marés apresenta um comportamento padrão, que se ajusta a uma função periódica de 12 horas. Dessa forma, seu impacto nos dados observados é de fácil manipulação e tem sido automatizado pelos equipamentos mais modernos. Por conseguinte, têm sido desconsiderados no fluxo de redução gravimétrica nos últimos anos (LAFEHR; NABIGHIAN, 2012).

• Redução de Ar-livre

Esta etapa tem por objetivo minimizar o efeito topográfico nas medições gravimétricas. Existe uma relação inversamente proporcional entre a elevação do ponto de medição e a gravidade observada (LAFEHR; NABIGHIAN, 2012), visto que um aumento na altitude significa um maior distanciamento do centro de massa terrestre (Figura 10).



Figura 10 – Gravidade observada em uma falésia com exagero topográfico. Modificado de LaFehr e Nabighian (2012).

Através de estudos e pressupondo alguns parâmetros, estima-se a redução de ar-livre (RAL) através da expressão:

$$RAL = +0.3086h , (3.3)$$

em que h é dado em metros e representa a altitude ortométrica (ou seja, distancia entre a superfície física e o geóide).

Conclui-se que esta correção tem grande relação com a altitude, o que sugere a necessidade de grande precisão na estimativa da elevação no ponto de medição (LAFEHR; NABIGHIAN, 2012). Além da cautela com a altitude, deve-se considerar a influência da massa atmosférica sobre o equipamento que impacta o valor medido de gravidade no local. Em suma, esta redução corrige o efeito do distanciamento da estação gravimétrica em relação ao centro de massa da Terra.

• Redução de terreno

Terrenos muito acidentados geram um efeito diferencial de massa em relação ao nível do mar, o que impacta os estudos de anomalia gravimétrica. Por exemplo, locais onde há uma ausência/excesso de massa em relação à estação gravimétrica devem ser considerados. Observa-se, na Figura 10, que a anomalia gravimétrica é influenciada tanto pelo excesso de massa em A como pela falta de massa em B, acarretando em imprecisões associadas à anomalia produzidas por alvos em subsuperfície (NETTLETON, 1971). Dessa forma, é necessário ajustar a topografia da área de estudo de forma que as quantidades de massa no espaço sejam respeitadas e, assim, torne a correção mais refinada.

• Redução Isostática

Inicialmente investigada por Pierre Bouguer em 1749, os efeitos isostáticos na anomalia gravimétrica observada foram constatados devido à incongruências entre os resultados esperados e os medidos em uma investigação na região da cadeia de montanhas andina (LAFEHR; NABIGHIAN, 2012).





Figura 11 – Modelos de compensação isostática apresentados por Airy(A) e Pratt(B). Modificado de LaFehr e Nabighian (2012).

Em suma, foi observado que o equilíbrio isostático está relacionado ao balanço entre o excesso de massa litosférica e a consequente compensação mantélica (Figura 11).

Classificados por LaFehr e Nabighian (2012) como os principais modelos para descrever a relação de equilíbrio entre crosta e manto, Airy et al. (1855) propõe que as montanhas possuem raízes e, por outro lado, Pratt et al. (1855), Pratt et al. (1859) defendem que a densidade crustal varia horizontalmente. Ambas as teorias concluem que existe uma profundidade de compensação onde as massas são contrabalanceadas, o que acarreta na correção isostática para obtenção da anomalia gravimétrica apropriada.

3.2.1 Redução de Bouguer

A redução Bouguer é um processo de preparação do dado gravimétrico que consiste em minimizar o efeito causado pelo excesso de massa relativo ao aumento de elevação entre a estação de medição e o datum considerado no levantamento. A remoção destas massas topográficas, de acordo com Carreira (2015), ocorre com a suposição do excesso de massa distribuído como um platô encurvado, de densidade homogeneamente distribuída, nomeado como calota de Bouguer (Figura 12).



Figura 12 – Ilustração do platô e da calota de Bouguer (CARREIRA, 2015).

A correção Bouguer, então, apresentará valores negativos em locais cuja topografia esteja acima do geóide e, consequentemente, a correção assumirá valores positivos se a topografia estiver abaixo do geóide. Existem duas aplicações comumente conhecidas (CARREIRA, 2015; LAFEHR; NABIGHIAN, 2012) para a redução de Bouguer: A Bouguer simples, aplicada em terrenos relativamente planos; e a Bouguer completa, cujo uso se torna necessário em terrenos com muitas ondulações topográficas. Assim, a correção de terreno deve ser aplicada para efeito de retirar a componente gravitacional gerada pela massa terrestre acima do geóide. Baseado no trabalho de Heiskanen (1965), Carreira (2015) descreve a redução de Bouguer para levantamentos em terra pela equação:

$$\Delta B_g = \Delta g - 0.3086h - 0.1119h - C_{cb} + C_t, \qquad (3.4)$$

na qual h é a altitude ortométrica, o termo C_{cb} é a correção da calota de Bouguer e o termo C_t é a correção de terreno.

A grande limitação da redução de Bouguer é determinar de forma precisa a densidade do terreno. Devido a pequena escala de variação da densidade nas rochas (entre $2.0 \text{ e } 3.0 \text{ g/cm}^3$) se torna complexa a determinação de um valor apropriado para a região de estudo que, ademais, pode possuir grande heterogeneidade e anisotropia.

Na prática, o valor de densidade para rochas da crosta terrestre (2.67 g/cm^3) é adotado na maioria dos levantamentos. Contudo esta suposição agrega generalizações na magnitude da anomalia gravimétrica resultante da redução de Bouguer. A anomalia Bouguer varia mais suavemente em regiões montanhosas do que a anomalia de ar-livre, o que indica que a primeira é mais apropriada para a interpolação de valores da gravidade. Para fins exploratórios, a anomalia Bouguer é a grandeza mais usual, uma vez que realça majoritariamente os contrastes de densidades em rochas da subsuperfície.

3.3 Densidade das rochas

A densidade média da Terra pode ser facilmente calculada através da relação entre seu volume e massa. Entretanto, a estratificação fundamental do planeta em crosta, manto e núcleo evidencia a heterogeneidade deste parâmetro.

Os fatores fundamentais que definem a magnitude da densidade nas rochas são a composição mineralógica, a porosidade e a saturação de fluidos. Ao supor uma rocha sem poros e, consequentemente, sem fluidos, obtém-se a densidade através da soma das densidades dos minerais composicionais ponderada pelo volume total de cada fase mineral. Já em suposições mais realísticas, consideram-se os fluidos presentes e a densidade da rocha se dá através da equação:

$$\rho_r = (1 - \phi) \times \rho_m - \phi \times \rho_f, \qquad (3.5)$$

em que ρ_r é a densidade total da rocha, ρ_m é a densidade da matriz rochosa, ρ_f é a densidade dos fluidos contidos nos poros e ϕ é a porosidade.

No âmbito da exploração mineral, a região de interesse para levantamentos gravimétricos é limitada pela zona de transição entre crosta e manto. Isto define a faixa de densidades estudadas entre 1600 e 2600 Kg/m^3 para rochas sedimentares, 2200 a 3300 Kg/m^3 para rochas ígneas e 2400 a 3500 Kg/m^3 para rochas metamórficas (LAFEHR; NABIGHIAN, 2012). A Figura 13 ilustra as diferentes densidades calculadas através de informações de campo para rochas comuns na crosta.



Figura 13 – Densidade de rochas comuns. Modificado de LaFehr e Nabighian (2012).

Percebe-se que a faixa de variação das densidades é pequena, variando entre 2000 e 3000 Kg/m^3 . Todavia, os equipamentos gravimétricos são suficientemente sensíveis para notar os contrastes de densidade. As variações laterais de camadas rochosas são responsáveis pelo surgimento destes contrastes, o que resulta em anomalias gravimétricas observadas em levantamentos.

Estas variações laterais são resultado de processos geológicos como falhamentos e soerguimentos e são essenciais para a observação de contraste de densidade entre rochas. A Figura 14 ilustra o soerguimento de quatro camadas horizontais que produzem uma anomalia Bouguer igual a $2\pi k\rho_1 t_1 + 2\pi k\rho_2 t_2 + 2\pi k\rho_3 t_3 + 2\pi k\rho_4 t_4$, em que ρ é a densidade da camada rochosa e t é a sua espessura. A diferença entre densidades lateralmente torna a situação geológica adequada para a gravimetria em detrimento de outros métodos geofísicos (LAFEHR; NABIGHIAN, 2012).



Figura 14 – Contraste de densidade entre camadas em quilogramas por metro cúbico. Modificado de LaFehr e Nabighian (2012).

3.4 Anomalias regional e residual

A anomalia gravimétrica é o resultado da soma das anomalias produzidas por diversas fontes em diferentes profundidades (TELFORD et al., 1990). De acordo com Telford et al. (1990), estas anomalias são causadas pelas variações laterais de densidade tanto na região de interesse como em regiões mais rasas e mais profundas. O efeito das anomalias visualizado em mapa é compatível à soma dos efeitos de todos as fontes de massa, sendo as mais profundas responsáveis por sinais de maior extensão horizontal e suaves (grandes comprimentos de onda). Já as anomalias geradas por fontes mais rasas geralmente são mais concentradas e acentuadas (curtos comprimentos de onda).

Por isso, as anomalias com maior comprimento de onda são conhecidas como anomalias regionais e as anomalias de menor comprimento de onda, anomalias residuais. Na interpretação gravimétrica, o conhecimento geológico prévio é de extrema importância na determinação da magnitude das anomalias regionais e residuais.

Nettleton (1971) discorre sobre os principais métodos matemáticos para separar as anomalias regionais e residuais, dentre os quais se destaca o método de ajuste polinomial, utilizado no processamento de dados do presente trabalho para obter um efeito estimado da anomalia Bouguer regional.

4 Materiais e Métodos

Os dados utilizados para a realização deste trabalho foram fornecidos pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) em janeiro de 2018. Os dados gravimétricos de diferentes levantamentos terrestres e aéreos foram compilados e enviados em formato .CSV, posteriormente processados e visualizados na plataforma *Jupyter Notebook* para compilação de scripts em *Python* 2.0. Esta plataforma é gratuita e foi obtida online através do site *https://www.anaconda.com/download/*.

Além dos dados gravimétricos, foram utilizadas duas linhas sísmicas (0026-1627 e 0026-1629) *post-stack* migradas do levantamento sísmico RECONCAVO-0039, posteriormente interpretadas no software *Petrel* com licença educacional disponibilizada para a instituição de ensino. Ademais, perfis de densidade de quatro poços operados pela PETROBRAS na Bacia do Recôncavo (7CX-96D, 1-NRR-1, 3SC-0017, 4SC-0016D) foram interpretados no software *Interactive Petrophysics*, também através de licença educacional.

A utilização de dados obtidos por meio de métodos geofísicos distintos objetiva reduzir a ambiguidade característica da interpretação geofísica devido a multiplicidade de soluções possíveis para a modelagem da morfologia do embasamento da bacia sedimentar.



Figura 15 – (a) Visualização gráfica da distribuição dos dados gravimétricos recebidos da ANP e (b) zoom na Bacia do Recôncavo, incluindo informações dos poços, linhas sísmicas e campos de produção da região.

4.1 Processamento dos dados gravimétricos

Os dados fornecidos foram georreferenciados em coordenadas geográficas (latitude, longitude) e, para efeito de maior acurácia e correlação com os demais dados geofísicos, foram definidas coordenadas métricas correspondentes na Projeção Universal Transversal de Mercator (UTM) referenciadas ao datum SAD69, através do código desenvolvido em Python 2.0. As correções gravimétricas foram feitas de antemão. A anomalia Bouguer foi utilizada como principal grandeza nas imagens geradas e na modelagem gravimétrica bidimensional a ser apresentada na Seção 4.2. A análise qualitativa inicial foi essencial para definição das limitações e competências dos dados recebidos, o que orientou o estudo e definiu os principais caminhos e métodos a serem utilizados ao longo da pesquisa.

A Figura 15 (a) apresenta a visualização do banco de dados de anomalia Bouguer, na margem continental. Já na Figura 15 (b), a região da Bacia do Recôncavo é destacada, realçando a anomalia Bouguer nela contida. Percebe-se que há um gradiente lateral suave distribuído ao longo da bacia. Adicionalmente, observam-se valores muito grandes na faixa de amplitudes do dado observado, conforme mostra a Figura 15. Tais aspectos sugerem que seja aplicada a técnica de remoção regional-residual (BLAKELY, 1996; TELFORD et al., 1990; NETTLETON, 1971).

4.1.1 Obtenção da anomalia residual

A obtenção da anomalia Bouguer residual via análise polinomial consiste em resolver um sistema linear a fim de obter os coeficientes do polinômio de grau N. O grau deste polinômio é estabelecido pelo usuário de forma que o ajuste entre a anomalia Bouguer regional observada e predita seja o mais adequado no sentido de mínimos quadrados. A equação 4.1 expressa a forma de um polinômio S(x, y) de grau N:

$$S(x,y) = c_a x^n + c_b y^n + \dots + c_1 x^5 + c_2 y^5 + c_3 x^4 + c_4 y^4 + c_5 x^3 + c_6 y^3 + c_7 x^2 + c_8 y^2 + c_9 x + c_{10} y,$$
(4.1)

onde x e y são as coordenadas dos vértices e $c_a, c_b, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9$ e c_{10} são os coeficientes a serem estimados. O conjunto de coeficientes que melhor ajusta o polinômio S(x, y) aos dados observados foram estimados através do estimador de Mínimos Quadrados Lineares:

$$\mathbf{p} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{d}, \tag{4.2}$$

em que **p** representa os parâmetros, **d** são os dados de anomalia Bouguer total e **A** é a matriz de sensibilidade, composta pelas derivadas parciais do polinômio S(x, y) em relação a cada um dos coeficientes contidos no vetor **p**. Uma vez obtido o vetor vetor **p**, o cálculo da anomalia Bouguer regional é determinado através da seguinte expressão:

$$\mathbf{d}(\mathbf{p}) = \mathbf{A}\mathbf{p}.\tag{4.3}$$

Para mais detalhes no que tange a implementação desta técnica, o leitor é convidado a Castro, Ferreira e Angulo (2008), Menezes (1997), Telford et al. (1990).

Após a aplicação de polinômios entre os graus quatro e sete para estimar a anomalia Bouguer regional predita para a região (Figura 16), o polinômio que resultou no melhor ajuste da anomalia residual foi o polinômio de grau seis (Figura 16 (e)). A anomalia residual obtida com o polinômio de grau seis (Figura 16 (f)) destacou a faixa de valores mais apropriada para a anomalia Bouguer na região de interesse e respeitou a tendência regional dos dados, mantendo os pontos de máximo e mínimo para a anomalia Bouguer destacados.

A obtenção da anomalia Bouguer regional consiste da simples subtração das anomalias Bouguer total pela anomalia Bouguer calculada através dos diferentes polinômios.

A filtragem foi realizada no banco de dados completo, visto que o método de ajuste polinomial foi melhor aplicado em um contexto com maior número de amostras. Dessa forma, o ajuste não mascarou o efeito dos corpos de massa mais rasos. Este processamento possibilita uma melhor compreensão das anomalias produzidas pelas fontes mais rasas na zona de interesse, excluindo efeitos de fontes mais profundas, que não estão associadas ao relevo do embasamento na bacia estudada.



Figura 16 – Anomalia regional obtida com polinômios e as respectivas anomalias residuais resultantes. Em (a) e (b): Grau 4; em (c) e (d): Grau 5; em (e) e (f): Grau 6 e em (g) e (h): Grau 7.

4.1.2 Delimitação da área de estudo

A compilação de dados gravimétricos cobre uma área extensa, que ultrapassa os limites da Bacia do Recôncavo e, consequentemente, abrange largas magnitudes da anomalia Bouguer na área de interesse, tornando-as generalizadas e mitigando as variações em pequena escala. Portanto, realizou-se a delimitação do banco de dados nas latitudes -12.5° a -12.7° e longitudes -38.4° a -38.9° de forma que as bordas flexural e de falha da bacia do Recôncavo fossem incluídas na região (Figura 17).



Figura 17 – (a) Visualização da anomalia Bouguer residual na Bacia do Recôncavo e (b) recorte da área de estudo.

4.1.3 Obtenção da seção gravimétrica 2D

A definição da seção AA', de direção NW-SE e com aproximadamente 82.5 Km, visa analisar a anomalia Bouguer na parte interna da bacia, compreendendo suas falhas de borda principais. Como conhecimento prévio, observa-se uma geometria interna em forma de "dominó", devido aos falhamentos normais característicos da bacia. Além de incluir as falhas de borda, o perfil também cruza as linhas sísmicas e está próximo dos poços citados anteriormente, como mostra a Figura 18.

Através da função *Profile* implementada em *Python* 2.0 na plataforma *Jupyter* notebook, foi calculada a anomalia Bouguer para 851 pontos interpolados entre o ponto inicial (borda flexural - A) e o ponto final (borda de falha - A'). A Figura 18 expressa a amplitude da anomalia Bouguer residual observada ao longo da seção. As amplitudes dos dados em seção apresentam faixas entre -20.0 e 0.0 mGal e algumas rugosidades são observadas. Tais características podem estar associadas a pequenas heterogeneidades do embasamento ou estruturas, como falhas e intrusões.



Figura 18 – Visualização gráfica da área de estudo e localização do perfil selecionado.

4.2 Modelagem direta bidimensional

A anomalia Bouguer está vinculada, de forma geral, a dois parâmetros físicos das rochas do embasamento: a densidade e a profundidade (DIAS; BARBOSA; SILVA, 2009). A relação entre este dois parâmetros, portanto, será correspondente à anomalia gravimétrica observada. Dessa forma, considerar os valores de densidade medidos através da perfilagem geofísica permite definir valores médios deste parâmetro na região, assim como a interpretação sísmica do refletor associado ao embasamento.

A interpretação sísmica, neste caso, possibilita uma faixa de valores para a profundidade do embasamento cristalino da bacia. A calibração do modelo gravimétrico com tais informações prévias permite que o ajuste entre os dados preditos e observados seja adequado e coerente com a evolução geológica da área.

Além da calibração multi-geofísica, aplicou-se o método de modelagem direta proposto por Rao, Chakravarthi e Raju (1994) aos dados em seção, para interpretar a morfologia do embasamento do compartimento sul da bacia. A modelagem foi realizada através de tentativa e erro, de forma interativa, através do código desenvolvido também em linguagem *Python*. A morfologia da bacia em estudo é aproximada por um polígono irregular, no qual cada vértice é obtido interativamente através de cliques. A análise final é baseada em comparação visual do ajuste dos dados obtido após a modelagem.

Rao, Chakravarthi e Raju (1994) verificam que o conceito de variação uniforme da densidade em profundidade não era suficiente para explicar determinados modelos de bacia sedimentar na região da Califórnia, EUA. Tal fenômeno impulsionou a equipe a analisar as respostas obtidas através da implementação de funções de densidade variável com a profundidade. Modelos de bacia que contém pacotes sedimentares sob condições de sobrecarga e aumento de pressão em profundidade são contemplados em Rao, Chakravarthi e Raju (1994).

4.2.1 Função hiperbólica de densidade

Dentre as principais variações não-lineares da densidade testadas por Rao, Chakravarthi e Raju (1994), a forma hiperbólica e a forma parabólica foram as destacadas. Para a aplicação apresentada neste trabalho, utilizou-se a formulação hiperbólica, descrita pela seguinte equação:

$$\Delta \rho(z) = \frac{\Delta \rho_0 \beta^2}{(\beta + z)^2},\tag{4.4}$$

em que $\Delta \rho(z)$ é o contraste de densidade na profundidade z, $\Delta \rho_0$ é o contraste de densidade extrapolado para a superfície terrestre e β é a taxa de variação da densidade em unidades de comprimento. A equação 4.4 depende quadraticamente de β e simula o fenômeno da compactação sedimentar. Vale salientar que esta é uma premissa necessária do método, que pode ser considerada uma generalização do processo para a Bacia do Recôncavo.

4.2.2 Cálculo da anomalia gravimétrica predita

Em um ponto P(0), é possível obter a anomalia gravimétrica $\Delta g(0)$ produzida por um polígono de seção transversal irregular através da integração do efeito gravimétrico representado pela seguinte expressão:

$$\Delta g(0) = \frac{2G \int \Delta \rho(z) z ds}{x^2 + z^2},\tag{4.5}$$

em que G é a constante universal da gravitação, $\Delta \rho(z)$ é representado pela equação 4.5, ds é o elemento diferencial das coordenadas (ds = dx * dz). Após alguma manipulação algébrica para representar os contornos do embasamento por um conjunto de vértices e arestas que formam o poligono irregular, obtém-se:

$$\Delta g(0) = \sum_{k=1}^{n} dg(k),$$
(4.6)

em que dg(k) é a contribuição do k-ésimo lado do polígono e n é o numero de lados. A soma de cada parcela dg(k) produz a anomalia Bouguer calculada em cada ponto de observação da seção interpolada.

Este método foi utilizado para modelar a seção definida no processamento dos dados gravimétricos. Como vínculo adicional, foram incorporadas informações obtidas na perfilagem de poços e na interpretação das linhas sísmicas mencionadas. Para mais detalhes a respeito da implementação das rotinas computacionais para a modelagem gravimétrica por polígonos, o leitor é convidado à (RAO; CHAKRAVARTHI; RAJU, 1994).

5 Resultados e discussões

A Figura 19 ilustra o fluxograma adotado no presente trabalho para obtenção e avaliação dos resultados obtidos.



Figura 19 – Fluxograma ilustrativo para elucidar os processos realizados.

A amarração dos dados de poço e sísmica 2D com a anomalia Bouguer residual e os produtos obtidos através do código em *Python* 2.0 evidenciaram estas estruturas, assim como o efeito das falhas flexural e de borda na definição dos depocentros da bacia sedimentar.

Na modelagem direta do embasamento da Bacia do Recôncavo, a função hiperbólica foi adotada para determinar a curva que melhor descreve a variação do contraste de densidade em profundidade. A Figura 20 mostra o valor de aproximadamente 0.2 g/cm^3

como contraste de densidade entre as rochas da superfície e do embasamento, com base em informações geológicas *a priori* e valores médios observados nos perfis de densidade dos poços próximos à seção gravimétrica. Segundo Ramos, Martins e Silva (2013), os contrastes de densidade atribuídos à região são consistentes com os modelados neste trabalho. Ainda, o valor de β utilizado para definição da função de densidade variável foi 7.57, em unidades de comprimento.



Figura 20 – Perfis de densidade obtidos nos poços 1-NRR-1 e 7CX-96D.

A curva obtida através das equações mencionadas na seção 4.2.1 e aplicada à área de estudo denota congruência em relação aos dados de densidade obtidos através dos poços 7CX-96D, 1-NRR-1, 3SC-0017 e 4SC-0016D, sendo os poços 1-NRR-1 e 7CX-96D exemplificados na Figura 20. Ou seja, a curva hiperbólica sugere a tendência decrescente dos contrastes de densidade, ao passo que a profundidade da bacia aumenta. Esse aspecto indica que os estratos sedimentares se tornam mais densos e inibem o contraste de densidade com as rochas do embasamento cristalino a medida que a bacia ganha espessura.

A comparação entre dados multi-geofísicos de diferentes escalas avaliativas aponta a eficiência do método proposto por Rao, Chakravarthi e Raju (1994) para estimar a variação não-linear da densidade em bacias sedimentares.

5.1 Resultado Preliminar: Modelo 1

As linhas sísmicas 0026-0027 e 0026-0039 foram interpretadas e sugeriram profundidades para o embasamento de aproximadamente 2000m e 4000m, respectivamente (Figura 21).



Figura 21 – Interpretação do embasamento nas linhas sísmicas em tempo e suas respectivas localizações na área de estudo.

Isso indica que o espessamento dos depocentros da bacia ocorre na direção NW-SE, ou seja, a partir da borda flexural até a borda de falha. Com base nas informações retiradas desta interpretação e aliadas ao conhecimento geológico prévio da área de estudo, um polígono com patamares entre 0m e 4000m de profundidade foi criado. Assim, obteve-se o modelo da Figura 22 (a).

O fluxograma sugerido por Rao, Chakravarthi e Raju (1994) possibilita o cálculo da anomalia gravimétrica correspondente ao modelo estrutural e a função densidade definidos (Figuras 22 (a) e (b)), o que permite que os dados preditos pelo modelo poligonal sejam comparados com os dados reais observados em campo, resultando no ajuste apresentado na Figura 22 (c). Percebe-se que o ajuste entre os dados apresenta razoável conformidade, com algumas discrepâncias nas bordas e na porção noroeste.



Figura 22 – Resultados obtidos através da modelagem com base em dados multi geofísicos.

Considerando as limitações do método de modelagem utilizado e ambiguidade associada aos métodos geofísicos, conclui-se que o resultado na Figura 22 não é satisfatório para uma interpretação coerente do embasamento na região. Neste estudo a integração de dados geofísicos (i.e., gravimetria, poço e sísmica) foi cautelosamente utilizada a fim de restringir as ambiguidades inerentes à modelagem gravimétrica bidimensional. A primeira limitação é atribuída à generalização imposta pela função hiperbólica, visto que esta se apresenta muito suavizada e não abrange as heterogeneidades das camadas sedimentares. A segunda limitação é referente à falta de resolução do método em evidenciar estruturas que produzem anomalias de pequena ordem (< 1mGal), o que torna o método uma ferramenta eficiente para interpretação de grandes estruturas tectônicas e sedimentares.

Além disso, o modelo considera que os sedimentos que preenchem a bacia são depositados em estratos horizontais, sem variação lateral, o que limita o modelo a uma situação geológica simplificada na porção sul da Bacia do Recôncavo (MILHOMEM et al., 2003; SANTOS, 2005; DESTRO et al., 2003; MAGNAVITA; SILVA; SANCHES, 2005).

Finalmente, a grande limitação do método utilizado para a modelagem direta é a impossibilidade de definir um modelo de embasamento heterogêneo, o que trouxe imprecisão entre o modelo definido e a geologia local descrita em diversos trabalhos, dentre eles o de Penteado (1999) e Silva (2006).

5.2 Resultado Final: Modelo 2

Penteado (1999) apresenta um modelo litoestratigráfico da Bacia do Recôncavo e faz a interpretação de uma seção geológica na região deste estudo (Figura 23) que diverge da morfologia sugerida pelo modelo 1 (Figura 22 (a)) na parte noroeste.



Figura 23 – Seção geológica na região de estudo. Modificado de Penteado (1999).

Silva (2006) reforça a interpretação de Penteado (1999) ao apresentar uma mapa

estrutural do topo do embasamento na Bacia do Recôncavo, criado através de uma modelagem geométrica computacional calibrada com dados de 100 poços (Figura 24).



Figura 24 – Mapa estrutural do topo do embasamento na Bacia do Recôncavo (SILVA, 2006).

Uma tendência de afundamento da bacia na direção sudeste é notória, todavia ambos os trabalhos não confirmam a presença de baixos estruturais de grande rejeito na porção noroeste, diferente do que é indicado pelo ajuste dos dados gravimétricos na Figura 22 (c). Por conseguinte, devido a multiplicidade de parâmetros físicos que influenciam a amplitude da anomalia Bouguer, outra modelagem foi realizada (Figura 24).

Foi considerado um dos resultados publicados por Silva (2006) para que fosse possível calcular a anomalia Bouguer para um modelo com profundidades menores na porção noroeste, segundo a Figura 25 (a). A função densidade utilizada foi a mesma do modelo 1 (Figura 25 (b)). A Figura 25 (c) destaca o ajuste entre a anomalia Bouguer predita pelo método de Rao, Chakravarthi e Raju (1994) e a anomalia observada.

O resultado evidenciado na Figura 25 indica algumas possibilidades interpretativas para a seção estudada. Como a anomalia Bouguer responde aos parâmetros físicos de densidade e profundidade da fonte, ambas características influenciam a amplitude do sinal gravimétrico visualizado no ajuste da Figura 25 (c). A função hiperbólica incorporada à modelagem impossibilita a variação lateral da densidade atribuída ao pacote sedimentar. Tal efeito pode ser uma justificativa aceitável para o desajuste observado na porção noroeste da seção. Todavia, a porção sudeste da seção apresenta ajuste satisfatórios dos dados e coerência com a geologia do local.

Inicialmente, pode-se considerar que o embasamento apresenta heterogeneidades,



Figura 25 – Resultados obtidos através da modelagem com base em informações geológicas a priori.

contendo porções rochosas menos densas na área noroeste e mais densas à sudeste na seção, o que torna a anomalia Bouguer entre as coordenadas UTM E 530000 e 520000 mais negativa do que no depocentro principal da bacia, localizado entre as UTM E 580000 e 570000.

De acordo com Silva et al. (2007), o embasamento da Bacia do Recôncavo é composto por distintos cinturões móveis que sofreram diferentes processos tectônicos e apresentam petrologia e mineralogia distinta. Logo, a resposta de -15 mGal obtida na porção noroeste da Figura 22 (c) não é necessariamente relativa a um rebaixamento tectônico do embasamento, mas sim, consequência da presença de uma rocha menos densa do que as rochas encaixantes. Isso está em total conformidade com a ambiguidade inerente ao método gravimétrico, em especial.

Caso o embasamento fosse homogêneo, a anomalia Bouguer observada na porção noroeste do perfil dependeria apenas das diferentes profundidades e deveria apresentar magnitude de -10 mGal, como visto na Figura 25 (c). Esta consideração incita à pes-

quisa mais aprofundada sobre as distinções entre terrenos formadores do embasamento e suas possíveis variações petrológicas, que podem modificar consideravelmente a análise gravimétrica.

Ainda que apresente limitações significantes, o método proposto por Rao, Chakravarthi e Raju (1994) e implementado no Python 2.0 apresenta potencialidades que colaboraram para a análise e compreensão da região de estudo.

O primeiro ponto positivo da técnica utilizada é a facilidade de criação do modelo de embasamento através do clique das coordenadas do polígono. Dessa forma, pode-se modelar a morfologia do embasamento com a quantidade de pontos e forma que se deseja. Outra vantagem do método é considerar o efeito físico da compactação sedimentar no contraste de densidade entre camadas na bacia. Mesmo com as dificuldades citadas anteriormente, foi possível introduzir ao modelo uma função que sugere que a densidade das rochas sedimentares aumenta com profundidade, o que é previsto do ponto de vista geológico para todas as bacias sedimentares.

• Interpretação geológica

Após as considerações mencionadas e os resultados obtidos, realizou-se uma interpretação da morfologia do compartimento sul da Bacia do Recôncavo, evidenciando sua profundidade estimada ao longo da seção e a coluna sedimentar que preenche a bacia (Figura 26).





Densidade do embasamento

Figura 26 – Interpretação geológica baseada no segundo modelo gerado e informações geológicas a priori.

As feições mais significativas da bacia foram bem ajustadas através do modelo utilizado, sendo estas o principal depocentro da bacia, o Baixo de Camaçari, platôs como a Plataforma de São Domingos e a rampa decrescente na direção noroeste que caracteriza o hemi-gráben. Todavia, o método não se mostrou efetivo para destacar estruturas de menor escala. Não obstante, a modelagem direta realizada proporcionou a análise crítica e técnica das possíveis causas geológicas do desajuste na porção noroeste da seção.

A heterogeneidade petrológica do embasamento influencia o valor de densidade ao longo da seção e, portanto, as anomalias Bouguer mais negativas observadas são, provavelmente, correspondentes à rochas de menor densidade, próximas à borda flexural da bacia. Além disso, enxames de diabásio e outras intrusões são características na porção sudeste da seção, que influencia a magnitude do sinal nesta localidade, tornando-o menos negativo. Em suma, a densidade do embasamento cristalino definida pode ser considerada como variável e segue um gradiente crescente na seção AA' de direção NW-SE.

6 Perspectivas futuras

A realização da análise qualitativa dos dados multi-geofísicos recebidos da Agência Nacional do Petróleo e sua interpretação posterior indicam que aprimoramentos são necessários para uma melhor compreensão da região de estudo. Espera-se que este trabalho impulsione novas investigações e novas abordagens técnicas em prol da tradução mais coerente dos dados geofísicos para a geologia do embasamento da Bacia do Recôncavo.

Inicialmente, investigações petrológicas e mineralógicas das rochas do embasamento devem ser conduzidas para que as informações diretas de densidade dos terrenos Arqueanos e Paleoproterozóicos sejam conhecidas e, dessa forma, possam comprovar a heterogeneidade observada na seção de estudo. Esta variação do parâmetro físico das rochas poderá, então, ser incorporada a futuros modelos e gerar resultados mais próximos à realidade geológica.

Além disso, esta investigação e consequente produção bibliográfica associada serão motivadoras para novos estudos de evolução continental, análise de bacias, geologia estrutural e sedimentar, além de maximizar a compreensão dos sistemas petrolíferos de interesse econômico na região.

A utilização de novas funções de densidade para o modelo de bacia sedimentar poligonal proposto por Rao, Chakravarthi e Raju (1994) podem ser consideradas. Almeja-se criar uma curva de densidades intervalares com base nos perfis de densidade dos poços na região e, assim, vincular informações de alta resolução à avaliação dos contrastes de densidade nas camadas sedimentares depositadas na bacia e compreender seu efeito na anomalia Bouguer observada. Ademais, é possível criar adaptações no código em *Python* 2.0 para que diferentes blocos possam ser acrescentados no modelo e, consequentemente, os diferentes terrenos amalgamados ou corpos intrusivos, que possivelmente formam o embasamento possam ser contemplados.

7 Conclusões

O presente trabalho utilizou a modelagem gravimétrica bidimensional como método para inferir a morfologia do embasamento no compartimento sul da Bacia do Recôncavo. Foi determinada uma seção gravimétrica AA' transversal à bacia de forma que o relevo interno fosse determinado.

A função hiperbólica de densidade utilizada sintetiza o efeito de compactação sofrido pelo pacote sedimentar em profundidade, situação usual em bacias sedimentares. Através da compilação do código desenvolvido em *Python* 2.0, foram propostos dois modelos de embasamento. Estes foram estimados através de informações multi-geofísicas (Modelo 1) e informações geológicas bibliográficas (Modelo 2). No modelo 1, a integração de dados geofísicos permitiu modelar o embasamento com o melhor ajuste regional possível, principalmente para estruturas de grande escala. Todavia, devido a ambiguidade característica do método gravimétrico, as interpretações resultantes sobre a morfologia do embasamento apresentaram incongruências em relação à informações geológicas prévias.

Por conta disto, o modelo 2 foi gerado, utilizando seções geológicas e mapas publicados como vínculo para a construção do relevo. Assim, foi observado um bom ajuste dos dados na porção sudeste do perfil e incompatibilidades na porção noroeste. A interpretação geológica apresentada como resultado sugere que podem existir heterogeneidades no embasamento cristalino da região estudada que produzem a anomalia Bouguer observada mais negativa na seção.

Referências

AIRY, G. B. et al. On the computation of the effect of the attraction of mountain-masses, as disturbing the apparent astronomical latitude of stations in geodetic surveys. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, The Royal Society, v. 145, p. 101–104, 1855.

ALKIMIN, F. Arcabouço tectônico do cráton de são francisco, uma revisão. In: SALVADOR. *III Simposio do Craton do Sao Francisco*. [S.l.], 1993. p. 45–62.

ALMEIDA, F. d. et al. Províncias estruturais brasileiras. Simpósio de Geologia do Nordeste, Campina Grande SBG, v. 8, n. 1977, p. 363–391, 1977.

ANP, S. d. D. e. P. Boletim de produção de petróleo e gás natural. Agência nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, n. 97, p. 1123–1144, 2018.

BARBOSA, J. S. F. et al. Petrografia e litogeoquímica das rochas da parte oeste do alto de salvador, bahia. 2005.

BLAKELY, R. J. Potential theory in gravity and magnetic applications. [S.l.]: Cambridge university press, 1996.

BONGIOLO, D. E.; SCHERER, C. M. Facies architecture and heterogeneity of the fluvial-aeolian reservoirs of the sergi formation (upper jurassic), recôncavo basin, ne brazil. *Marine and Petroleum Geology*, Elsevier, v. 27, n. 9, p. 1885–1897, 2010.

BUENO, G. Considerações sobre a sedimentação e origem do paleocanyon de taquipe, bacia do recóncavo, brasil. *Disseração de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto*, 1987.

CARREIRA, V. R. Aplicação dos métodos potenciais e eletromagnéticos na contribuição do entendimento das estruturas geológicas da região central da bacia do paraná, centro-sul do brasil. 2015.

CASTRO, L. G. d.; FERREIRA, F. J.; ANGULO, R. J. Modelo gravimétrico-magnético do gráben de paranaguá-pr, brasil. *Revista brasileira de geofísica*, SciELO Brasil, v. 26, n. 3, p. 273–292, 2008.

DESTRO, N. et al. Release faults, associated structures, and their control on petroleum trends in the recncavo rift, northeast brazil. *AAPG bulletin*, American Association of Petroleum Geologists, v. 87, n. 7, p. 1123–1144, 2003.

DIAS, F. J. S.; BARBOSA, V. C.; SILVA, J. B. 3d gravity inversion through an adaptive-learning procedure. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 74, n. 3, p. I9–I21, 2009.

FUJIMORI, S. Condições de p
t de formação dos granulitos do farol da barra, salvador, bahia, brasil
. Revista Brasileira de Geociências, v. 18, n. 3, p. 339–344, 1988.

GUERRA, G. S.; BORGUI, L. Fácies sedimentares gravitacionais e deformacionais da formação maracangalha em afloramento e sua importância na exploração da bacia do recôncavo. In: 2º Congresso Brasileiro de P&D de Petróleo e Gás. Anais. Rio de Janeiro./Links]. [S.l.: s.n.], 2003.

GUIMARÃES, J. T. Projeto bacia do tucano sul. 2002.

JUNIOR, T. O. *Geologia do extremo nordeste do Cráton do São Francisco, Bahia.* Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 1990.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. *Geofísica de exploração*. [S.l.]: Oficina de Textos, 2009.

LAFEHR, T. R.; NABIGHIAN, M. N. Fundamentals of gravity exploration. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2012.

MAGNAVITA, L.; SILVA, R. d.; SANCHES, C. Guia de campo da bacia do recôncavo, ne do brasil. *Boletim de Geociencias da PETROBRAS*, v. 13, n. 2, p. 301–334, 2005.

MAGNAVITA, L. P.; SILVA, H. T. da. Rift border system: the interplay between tectonics and sedimentation in the recôncavo basin, northeastern brazil. *AAPG bulletin*, American Association of Petroleum Geologists, v. 79, n. 11, p. 1590–1607, 1995.

MELO, R. d. Geologia regional: análise do conhecimento adquirido pelo projeto gaviao–serrinha filha mundo novo. *Mundo Novo, folha SC*, v. 24, p. 18–21, 1991.

MENEZES, P. Uma nova abordagem na interpretação de anomalias gravimétricas em bacias sedimentares-exemplo da bacia do recôncavo, bahia, brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, SciELO Brasil, v. 15, n. 2, p. 179–180, 1997.

MILHOMEM, P. et al. Bacias sedimentares brasileiras: Bacia do recôncavo. *Fundação Paleontológica Phoenix*, v. 5, n. 51, 2003.

NETTLETON, L. L. *Elementary gravity and magnetics for geologists and seismologists*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1971.

NETTO, A. S. T.; OLIVEIRA, J. J. de. O preenchimento do rift-valley na bacia do recôncavo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 15, n. 2, p. 97–102, 1985.

NEVES, B. d. B. Crátons e faixas móveis. Boletim IG-USP, v. 7, 1995.

OKAYA, D. et al. Continent-continent collision at the pacific/indo-australian plate boundary: Background, motivation, and principal results. *A Continental Plate Boundary: Tectonics at South Island, New Zealand*, Wiley Online Library, p. 1–18, 2007.

OLIVEIRA, E. et al. Geologic correlation between the neoproterozoic sergipano belt (ne brazil) and the yaoundé belt (cameroon, africa). *Journal of African Earth Sciences*, Elsevier, v. 44, n. 4-5, p. 470–478, 2006.

PADILHA, A.; MELO, R. Estruturas e tectônica. Programe de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB); Folha SC, p. 49–54, 1991.

PENTEADO, H. L. d. B. Modélisation compositionnelle 2D de la genèse, expulsion et migration du pétrole dans le Compartiment Sud du Bassin de Recôncavo, Brésil. Tese (Doutorado) — Paris 6, 1999.

PONTE, F. et al. Evolução paleogeográfica do brasil oriental e áfrica ocidental. *CPEG*, v. 4, p. 71, 1971.

PRATT, J. H. et al. On the attraction of the himalaya mountains, and of the elevated regions beyond them, upon the plumb-line in india. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, The Royal Society, v. 145, p. 53–100, 1855.

PRATT, J. H. et al. On the deflection of the plumb-line in india, caused by the attraction of the himmalaya mountains and of the elevated regions beyond; and its modification by the compensating effect of a deficiency of matter below the mountain mass. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, The Royal Society, v. 149, p. 745–778, 1859.

RAMOS, L. C.; MARTINS, C.; SILVA, J. Procedimentos lineares e inversão gravimétrica para estimar o relevo do embasamento de bacias sedimentares. In: SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS AND BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY. 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013. [S.I.], 2013. p. 531–536.

RAO, C. V.; CHAKRAVARTHI, V.; RAJU, M. Forward modeling: Gravity anomalies of two-dimensional bodies of arbitrary shape with hyperbolic and parabolic density functions. *Computers & Geosciences*, Elsevier, v. 20, n. 5, p. 873–880, 1994.

RIOS, D. C. et al. Geologic evolution of the serrinha nucleus granite–greenstone terrane (ne bahia, brazil) constrained by u–pb single zircon geochronology. *Precambrian Research*, Elsevier, v. 170, n. 3-4, p. 175–201, 2009.

SANTOS, C. d.; CUPERTINO, J.; BRAGA, J. E. Síntese sobre a geologia das bacias do recôncavo, tucano e jatobá. *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*, PETROBAS, Rio de Janeiro, Brazil, p. 269–289, 1990.

SANTOS, C. F. Ciclicidade ao tempo do andar buracica (neobarremiano) da bacia do recôncavo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, p. 115–126, 2005.

SCHOBBENHAUS, C.; NEVES, B. B. d. B. A geologia do brasil no contexto da plataforma sul-americana. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Brasília, CPRM*, p. 5–25, 2003.

SILVA, L. C. da et al. Reavaliação da evolução geológica em terrenos pré-cambrianos brasileiros com base em novos dados u-pb shrimp, parte i: limite centro-oriental do cráton são francisco na bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 32, n. 4, p. 501–512, 2002.

SILVA, O. d. et al. Bacia do recôncavo. *Boletim de Geociencias da PETROBRAS*, v. 15, n. 2, p. 423–431, 2007.

SILVA, T. C. S. D. da. *Modelagem de geração e migração do petróleo na Bacia do Recôncavo, BA*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

SOUZA-OLIVEIRA, J. S. d. et al. Lithogeochemistry and geochronology of the subalkaline felsic plutonism that marks the end of the paleoproterozoic orogeny in the salvador-esplanada belt, são francisco craton (salvador, state of bahia, brazil). *Brazilian journal of geology*, SciELO Brasil, v. 44, n. 2, p. 221–234, 2014.

TEIXEIRA, L. R. O complexo Caraíba e a suíte São José do Jacuípe no cinturão Salvador-Curaçá (Bahia, Brasil): petrologia, geoquímica e potencial metalogenético. Tese (Doutorado), 1997.

TELFORD, W. M. et al. Applied geophysics. [S.l.]: Cambridge university press, 1990. v. 1.

WIEDERKEHR, F. Arquitetura estratigráfica das formações itaparica e água grande e seu posicionamento na evolução tectônica da bacia do recôncavo. 2008.

WINGE, M. et al. Glossário geológico ilustrado.[2018]. WWW:<http://sigep.cprm.gov.br/glossario, 2018.