



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

Bernardo Peluso Erthal de Souza

**HIGH-RESOLUTION MULTICHANNEL SEISMIC IMAGING OF GUANABARA
BAY TECTONIC STRUCTURES, RIO DE JANEIRO, BRAZIL**

Niterói/RJ

2024



Bernardo Peluso Erthal de Souza

**HIGH-RESOLUTION MULTICHANNEL SEISMIC IMAGING OF GUANABARA
BAY TECTONIC STRUCTURES, RIO DE JANEIRO, BRAZIL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Geologia e Geofísica.

Orientador: Luiz Antônio Pierantoni Gambôa

Coorientador: Cleverson Guizan Silva

Niterói/RJ

2024

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

D278h De Souza, Bernardo Peluso Erthal
HIGH-RESOLUTION MULTICHANNEL SEISMIC IMAGING OF GUANABARA
BAY TECTONIC STRUCTURES, RIO DE JANEIRO, BRAZIL / Bernardo
Peluso Erthal De Souza. - 2024.
31 f.: il.

Orientador: Luiz Antônio Pierantoni Gamboa.
Coorientador: Cleverton Guizan Silva.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Instituto de Geociências, Niterói, 2024.

1. Baía de Guanabara. 2. Sísmica. 3. Neotectônica. 4.
Graben da Guanabara. 5. Produção intelectual. I. Gamboa,
Luiz Antônio Pierantoni, orientador. II. Silva, Cleverton
Guizan, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense.
Instituto de Geociências. IV. Título.

CDD - XXX

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368



Bernardo Peluso Erthal de Souza

**HIGH-RESOLUTION MULTICHANNEL SEISMIC IMAGING OF GUANABARA
BAY TECTONIC STRUCTURES, RIO DE JANEIRO, BRAZIL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e
Terra da Universidade Federal Fluminense, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de Mestre em Geologia e Geofísica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luiz Antônio Pierantoni Gamboa – Orientador (LAGEMAR/UFF)

Prof. Dr. Cleverson Guizan Silva – Coorientador (LAGEMAR/UFF)

Prof. Dr. Reiner Olíbano Rosas (LAGEMAR/UFF)

Prof. Dr. Davy Raeder Brandão (LAGEMAR/UFF)

Prof. Dr. Douglas Nemes (UERJ)

AGRADECIMENTOS

Concluir esta dissertação representa a realização de um sonho e um marco importante na minha vida acadêmica e profissional. Esta jornada não teria sido possível sem o apoio, incentivo e orientação de várias pessoas às quais gostaria de expressar minha profunda gratidão.

Primeiramente, agradeço à minha família, pelo apoio e incentivo incondicional. Aos meus avós Lourdes, Tereza, Otávio e Erimá por me ensinarem a perseverar na vida. À minha mãe Luiza por sempre me encorajar e iluminar o meu caminho, ao meu pai Oscar, por me ensinar o valor da educação e do trabalho, e ao meu irmão Vinicius, por diversificar e ampliar meus horizontes.

À minha noiva Fernanda pela paciência, compreensão e carinho que me sustentaram ao longo deste trabalho. Sua vibração me impulsiona a alcançar o intangível. Seu apoio emocional e incentivo constante foram essenciais para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos meus amigos, que me proporcionaram momentos de reflexão, descontração e alívio necessários durante esse período. Agradeço por estarem sempre presentes, oferecendo apoio e compartilhando a vida comigo.

Sou profundamente grato aos meus orientadores Luiz Gamboa e Cleverson, cujos conhecimentos, experiência e orientações precisas foram indispensáveis para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por acreditarem em mim e me guiarem com sabedoria e dedicação.

Aos co-autores e colaboradores desta pesquisa, Davy, Sidney e Etienne, meu sincero agradecimento. A troca de ideias, a colaboração e o trabalho em equipe foram essenciais para o avanço e enriquecimento deste estudo.

Por fim, dedico este trabalho aos antepassados que contribuíram significativamente para a pesquisa nesta área. Sua dedicação, descobertas e contribuições científicas pavimentaram o caminho que me permitiu alcançar este objetivo. Sou grato pelo legado que deixaram e por terem aberto portas para novas possibilidades e conhecimentos.

A todos vocês, meu mais sincero e profundo agradecimento. Esta conquista é, em grande parte, resultado do apoio, da colaboração e do amor que recebi de cada um de vocês.

“É importante viver a experiência da nossa própria circulação pelo mundo, não como uma metáfora, mas como fricção, poder contar uns com os outros.”

Ailton Krenak

RESUMO

A Baía de Guanabara é uma porção inundada do Graben de Guanabara, uma depressão tectônica de forma romboidal formada aproximadamente há 60 milhões de anos durante o soerguimento da Serra do Mar. A baía está na área metropolitana do Rio de Janeiro (Brasil). É caracterizada por exuberantes afloramentos de seu embasamento cristalino, os maciços costeiros, compostos por granitos e gnaisses do Pré-Cambriano, que estreitam a única entrada oceânica da baía ao sul e emergem dentro dela, formando ilhas, ilhotas e lajes, criando uma paisagem única. Este trabalho utiliza reflexão sísmica multicanal para imagear a complexa geologia subjacente da Baía de Guanabara, que é intercalada por eventos de elevação e queda do nível do mar resultantes de variações climáticas recentes. Essas imagens também mostram evidências sísmicas de atividade neotectônica em sedimentos da Formação Caceribu. O evento tectônico mais recente aproveitou planos de falhas transcorrentes pré-existentes, orientados na direção E-W, e deformou unidades sedimentares da Baía de Guanabara relacionadas ao Pleistoceno e Holoceno. O que corrobora, através da sísmica, o que já foi mapeado por outros trabalhos através de métodos diretos em outras regiões do Gráben da Guanabara. As seções sísmicas mostra falhas normais no embasamento, estruturas em flor negativa e sedimentação sintectônica. Características tectônicas transcorrentes e extensivas também podem ser observadas em registros magnéticos através de estruturas de forma romboédrica. A atividade neotectônica observada nas partes sul do Rift Continental do Sudeste do Brasil alinha-se com as evidências das seções sísmicas da Baía de Guanabara. Isso demonstra a natureza regional dos processos tectônicos dentro das bacias do CRSB.

Palavras-chave: Baía de Guanabara; Sísmica; Neotectônica; Graben da Guanabara; Rift Continental do Sudeste do Brasil

ABSTRACT

Guanabara Bay is a flooded portion of the Guanabara Graben, a rhomboid-shaped tectonic depression formed approximately 60Ma during the uplift of the Serra do Mar. The bay is in the metropolitan area of Rio de Janeiro (Brazil). It is characterized by exuberant outcrops of its crystalline basement, the coastal massifs, composed of Precambrian granites and gneisses, which narrow the only oceanic entrance to the bay in the south and emerge within it, forming islands, islets, and slabs, making it a unique landscape. This work uses multichannel seismic reflection to image the complex sub-bottom geology of Guanabara Bay, which is intercalated by sea level rise and fall events resulting from recent climatic variations. These images also show seismic evidence of neotectonics activity in sediments of Caceribu Formation. Latest tectonic event took advantage of pre-existing transcurrent fault planes, E-W oriented, and deformed sedimentary units of Guanabara Bay related to Pleistocene and Holocene. Seismic images corroborate what was mapped by other studies through direct observations at other parts of Guanabara Graben. Seismic sections show basement normal faults, negative flower structure and sin-tectonic sedimentation. Transcurrent and extensive tectonics features also can be observed in magnetic records through rhombohedral shape structures. Neotectonics activity observed in the southern parts of the Continental Rift of Southeastern Brazil aligns with the evidence from Guanabara Bay seismic sections. This demonstrates the regional nature of the tectonic processes within CRSB basins.

Keywords: Guanabara Bay; Seismic; Neotectonics; Guanabara Graben; Continental Rift of Southeastern Brazil

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figure 1. Location map of multichannel seismic sections at Guanabara Bay overlaid with lithology provided by CPRM institute.	17
Figure 2. . Seismic acquisition geometry	Erro! Indicador não definido.
Figure 3. Fig. 3. Seismic processing sequence..	Erro! Indicador não definido.
Figure 4. a) Raw shot gathered before the band-pass filter. b) Shot gather after band-pass filter. c) Difference between before and after band-pass filter. This shows that the filtering is not removing any signal, just attenuating noise.....	Erro! Indicador não definido.
Figure 5. a) Single channel seismic section. b) Multichannel seismic section.	Erro! Indicador não definido.
Figure 6. Seismic section S1 in “Boca da Barra”, in the entrance of Guanabara Bay.	Erro! Indicador não definido.
Figure 7. Seismic section S2 in between Governador Island and Paquetá Island, inner part of the bay.	23
Figure 8. Not interpreted and interpreted Seismic Section 1. Section parallel to the talweg located at the entrance of the bay near “Boca da Barra”. High erosion is observed at this location as this section only contains recent sediment deposits. First and second order water bottom multiple, and basement multiple can be observed. Three normal faults are interpreted.	25
Figure 9. Seismic section S2 is in an internal part of the bay between Paquetá Island and Governador Island. Normal faults and negative flower structure can be observed. The deformation of U3 sediments on the eastern flank of the flower structure evidences neotectonics activity within Guanabara Graben.	26
Figure 10. Magnetic Data of Guanabara Bay. RJP and RBG - rhombohedra of Jacarepaguá and Guanabara Bay. Possible blocks displaced by transpression bounded by strike-slip fault zones..	Erro! Indicador não definido.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	ÁREA DE ESTUDO	12
3	OBJETIVOS	14
4	ARTIGO: HIGH-RESOLUTION MULTICHANNEL SEISMIC IMAGING OF GUANABARA BAY TECTONIC STRUCTURES, RIO DE JANEIRO, BRAZIL	15
4.1	INTRODUCTION	Erro! Indicador não definido.
4.2	GEOLOGICAL SETTING	Erro! Indicador não definido.
4.3	METHODS	Erro! Indicador não definido.
4.4	RESULTS	Erro! Indicador não definido.
4.6	CONCLUSIONS	Erro! Indicador não definido.
4.7	ACKNOWLEDGEMENTS	28
4.8	REFERENCES	28
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	31

1 INTRODUÇÃO GERAL

A Baía de Guanabara é uma das feições mais marcantes da costa brasileira. A baía corresponde à porção inundada do Graben de Guanabara, uma estrutura controlada tectonicamente entre o Cretáceo Superior e o final do Pleistoceno por quatro campos de tensões paleogeográficas (Ferrari, 2001). Sua origem está associada à resposta ao soerguimento Paleoceno da Serra do Mar e dos maciços costeiros, e à subsequente subsidência do Graben de Guanabara. No entanto, o preenchimento sedimentar mais recente está relacionado a variações paleoclimáticas e flutuações do nível do mar. A Baía de Guanabara se forma durante a última transgressão marinha, no final do Pleistoceno, que inunda um vale fluvial do Pleistoceno Inferior (Amador, 1976, 1978 e 1997; Silva et al., 2019). Portanto, a baía resulta do tectonismo, das variações climáticas recentes e da sedimentação do Graben de Guanabara. Riccomini (1989) e Ferrari (2001) fornecem evidências de atividade neotectônica através de afloramentos na região, datando pelo menos do final do Pleistoceno, e discutem evidências de tectonismo recente relativo ao Holoceno.

O estudo da Baía de Guanabara inclui a aquisição de 30 km de dados sísmicos marinhos rasos de multicanais 2D (Figura 1). A pesquisa investiga as falhas de reativação neotectônicas dentro dos depósitos da Formação Caceribu a partir da interpretação sísmica multicanal. Além disso, discute-se a aquisição, processamento e interpretação dos dados, revelando deformações tectônicas transcorrentes e o processo geológico de formação da Baía de Guanabara através da sísmica multicanal.

O estudo demonstra a necessidade da sísmica multicanal para o avanço da compreensão geológica, especialmente em regiões como a Baía de Guanabara, situada dentro da estrutura do Graben de Guanabara, no contexto do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). A pesquisa também destaca a importância de compreender a relação entre o tectonismo e a sedimentação na Baía de Guanabara, sublinhando a relevância da sísmica multicanal para investigações sismoestratigráficas costeiras.

2 ÁREA DE ESTUDO

Graben de Guanabara é uma estrutura proeminente dentro do Rift Continental do Sudeste do Brasil (CRSB), delineado por Almeida (1976) como o Rift de Guanabara, estendendo-se da Baía de Sepetiba até Barra de São João. Delimitado pela Serra do Mar ao norte e pelos maciços costeiros ao sul, apresenta depressões com altitudes raramente excedendo 100m, exceto por maciços de rochas alcalinas que atingem quase 1000m (Ferrari, 1990). Ferrari (2001) identifica quatro eventos de deformação.

O Evento 1, datado do Campaniano-Eoceno Inferior, iniciou a formação do graben com o movimento transcorrente sinistral. O Evento 2 facilitou o estabelecimento da Bacia de Macacu, seguido pelo Evento 3, observado nos sedimentos da Formação Macacu. O Evento 4, caracterizado pela extensão E-W, afetou os períodos Pleistoceno e Holoceno. A neotectônica, segundo Obruchev (1948), abrange do Terciário Superior ao Quaternário, e foi observada por Ferrari (2001) dentro do Graben de Guanabara.

O preenchimento sedimentar começou com depósitos lacustres e de leques aluviais da Formação Macacu, seguidos por depósitos fluviais da Formação Caceribu, marcados por uma discordância erosiva significativa. A formação da Baía de Guanabara ocorreu durante a última transgressão marinha, aproximadamente 20.000 anos AP, com subseqüentes flutuações do nível do mar afetando a extensão da inundação do Graben de Guanabara.

As direções de fraqueza herdadas do embasamento da Baía de Guanabara estão relacionadas a eventos tectônicos entre o Neoproterozoico e o Cambriano durante o processo de construção do Cinturão Ribeira (Valeriano et al., 2012). As rochas do embasamento do Rio de Janeiro são compostas principalmente por gnaisses e granitoides sin-colisionais (Heilbron et al., 2020) e faixas de rochas metassedimentares compostas por folhelhos, arenitos e carbonatos. Essas rochas originam-se de uma margem paleo-passiva, e devido à sua composição mineral consistindo de aluminossilicatos acoplados com foliação tectônica, facilitam a reativação em níveis crustais rasos, como no caso dos diques toleíticos e brechas tectônicas silicificadas preenchendo falhas normais.

Ao redor da Baía de Guanabara, várias fraturas preenchidas com diques toleíticos e zonas de falhas frágeis preenchidas com brechas tectônicas são reconhecidas. Os diques toleíticos têm direções variando de NNE-SSW a NE-SW e espessuras variando de centímetros a decâmetros, como visto no dique que ocorre na Falésia de Itaipu, que pode ser observado através de imagens de satélite. A relação entre a direção dos diques e a foliação do embasamento é paralela a sub-paralela, indicando que a direção do estresse regional é oblíqua à direção de fraqueza do embasamento (Brandão, 2019).

As falhas também são controladas pela direção preferencial do embasamento, paralela a sub-paralela à foliação. As falhas são orientadas NE-SW, formando alinhamentos de ilhas ou mesmo moldando o terreno com deslocamentos de centenas de metros. Essas falhas são comumente associadas à intrusão de corpos maciços alcalinos, datando assim do Cretáceo Superior ao Paleogeno Inferior. Indicações de movimento tectônico ao longo de planos intemperizados dessas falhas sugerem reativação mais recente, possivelmente no Neogeno, de acordo com relações regionais (Riccomini et al., 2004; Brandão, 2019).

Na cidade de Niterói, falhas silicificadas se destacam no relevo das “Ilhas dos Cardos”, “Pedras de Itapuca” e “Pedra do Índio”, ao longo da orla da Praia de Icaraí (Brandão, 2019). No Rio de Janeiro, falhas silicificadas também influenciam a geomorfologia, sendo as Falhas das Paineiras as mais conhecidas. Localizadas na estrada com o mesmo nome, perto da entrada do Corcovado, onde está a estátua do Cristo Redentor (Silva et al., 1991). Na borda norte do “Morro Cara de Cão”, o embasamento é deformado por uma falha silicificada, que se projeta em direção às rochas que sustentam o “Forte Tamandaré da Lage” (Valeriano & Magalhães, 1984).

Analisando dados potenciais regionais, é possível identificar formas romboidais no embasamento da Baía de Guanabara e arredores (Gamboa et al., 2021). A Baía de Guanabara está situada dentro de um bloco romboidal subsidente bem definido, delineado por seus limites aflorantes. A forma romboidal pode resultar de deformação por cisalhamento ao longo de zonas de fraqueza herdadas do embasamento (Gamboa et al., 2021), ou pode ser o resultado geomorfológico da interação entre falhas cenozoicas com tendência NE-SW e diques toleíticos com tendência NNE-SSW.

A origem da baía remonta à inundação de uma depressão continental que abrigava o paleo-Rio Guanabara (Amador, 1997), um antigo vale fluvial estabelecido no Pleistoceno, quando o nível relativo do mar estava até 140m abaixo dos níveis atuais (Silva et al., 2019). Este vale fluvial foi inundado pela elevação do Oceano Atlântico durante a última transgressão marinha 20.000 anos AP, que atingiu até 5m acima dos níveis atuais 7.000 anos AP, alcançando parte da Baixada Fluminense e os sopés da Serra do Mar (Amador, 1997), fazendo com que a baía ocupasse uma área maior do que a atual. O nível do mar então flutuou para baixo até alcançar seu nível atual (Silva et al., 2019).

A subsuperfície da Baía de Guanabara, portanto, fornece informações sobre o tectonismo no Graben de Guanabara, a sedimentação continental do graben e, mais recentemente, com o afogamento do vale fluvial, sobre sua sedimentação estuarina. Os sedimentos estuarinos preservam informações importantes sobre variações climáticas, pois são responsáveis por flutuações do nível do mar.

3 OBJETIVOS

O objetivo do estudo é imagear estruturas tectônicas da Baía de Guanabara e consequentemente aprimorar o conhecimento do arcabouço estrutural do Gráben da Guanabara. Além disso, também faz parte desse estudo entender a relação entre o tectonismo e a sedimentação da região através da sísmica multicanal. A aquisição de dados sísmicos multicanal é inédita para a Baía de Guanabara, portanto, o trabalho desenvolve um fluxo básico de processamento sísmico multicanal e discute o impacto da utilização desta tecnologia em ambientes marinhos rasos.

4 ARTIGO: HIGH-RESOLUTION MULTICHANNEL SEISMIC IMAGING OF GUANABARA BAY TECTONIC STRUCTURES, RIO DE JANEIRO, BRAZIL

Bernardo Peluso Erthal de Souza^{1,*}, Davy Raeder Brandão¹, André Etienne Ferraz¹,
Cleverson Guizan Silva¹, Luiz Antônio Pierantoni Gambôa¹, Sidney Araujo Melo¹

¹Marine Geology Laboratory - LAGEMAR, Department of Geology and Geophysics, Institute of Geosciences, Federal Fluminense University, Niterói – RJ, Brazil;

*Corresponding Author:

bernardopeluso@id.uff.br

Av. Milton Tavares de Souza - Gragoatá, Niterói - RJ, 24210-346

+5548999718042

Submetido à revista *Brazilian Journal of Geophysics* em 21/05/2024.

ABSTRACT. Guanabara Bay is a flooded portion of the Guanabara Graben, a rhomboid-shaped

tectonic depression formed approximately 60Ma during the uplift of the Serra do Mar. The bay is in the metropolitan area of Rio de Janeiro (Brazil). It is characterized by exuberant outcrops of its crystalline basement, the coastal massifs, composed of Precambrian granites and gneisses, which narrow the only oceanic entrance to the bay in the south and emerge within it, forming islands, islets, and slabs, making it a unique landscape. This work uses multichannel seismic reflection to image the complex sub-bottom geology of Guanabara Bay, which is intercalated by sea level rise and fall events resulting from recent climatic variations. These images also show seismic evidence of neotectonics activity in sediments of Caceribu Formation. Latest tectonic event took advantage of pre-existing transcurrent fault planes, E-W oriented, and deformed sedimentary units of Guanabara Bay related to Pleistocene and Holocene. Seismic shows basement normal faults, negative flower structure and sin-tectonic sedimentation. Transcurrent and extensive tectonics features also can be observed in magnetic records through rhombohedral shape structures. Neotectonics activity observed in the southern parts of the Continental Rift of Southeastern Brazil aligns with the evidence from Guanabara Bay seismic sections. This demonstrates the regional nature of the tectonic processes within CRSB basins.

Keywords: Guanabara Bay; Seismic; Neotectonics; Guanabara Graben; Continental Rift of Southeastern Brazil

INTRODUCTION

Guanabara Bay is one of the most prominent features of Brazil's coast. The bay is the flooded portion of the Guanabara Graben, a structure that was tectonically controlled between the Upper Cretaceous and the late Pleistocene by four fields of paleo tensions (Ferrari, 2001). Its origin is associated with a response to the Serra do Mar and coastal massifs Paleocene uplift, and the subsequent subsidence of the Guanabara Graben. However, its most recent sedimentary fill is associated with paleoclimatic variations and consequent sea-level fluctuations. Guanabara Bay was formed during the last marine transgression, the Late Pleistocene, which drowned an Early Pleistocene river valley (Amador, 1976, 1978, and 1997; Silva et al., 2019). Therefore, the bay is the result of tectonism, recent climatic variations, and sedimentation of Guanabara Graben. Riccomini (1989) and Ferrari (2001) provide evidence of neotectonics activity through outcrops in the region, dating back at least to the end of the Pleistocene, and discuss evidence of recent tectonism relative to the Holocene.

We studied Guanabara Bay, acquiring 30 km of 2D multichannel marine shallow water seismic data (Figure 1). The research investigated the neotectonics reactivation faults within the Caceribu Formation deposits from multichannel seismic interpretation. Further, we discuss data acquisition, processing and interpretation, revealing transcurrent tectonic deformations and the geological process of Guanabara Bay's formation.

The study demonstrates the necessity of multichannel seismic for advancing geological understanding, particularly in regions like Guanabara Bay, inside the structure of Guanabara Graben that is within the Continental Rift of Southeastern Brazil (CRSB) context. The research also highlights the importance of understanding the relationship between tectonism and sedimentation in Guanabara Bay, underscoring the significance of multichannel seismic for seismic stratigraphic investigations.

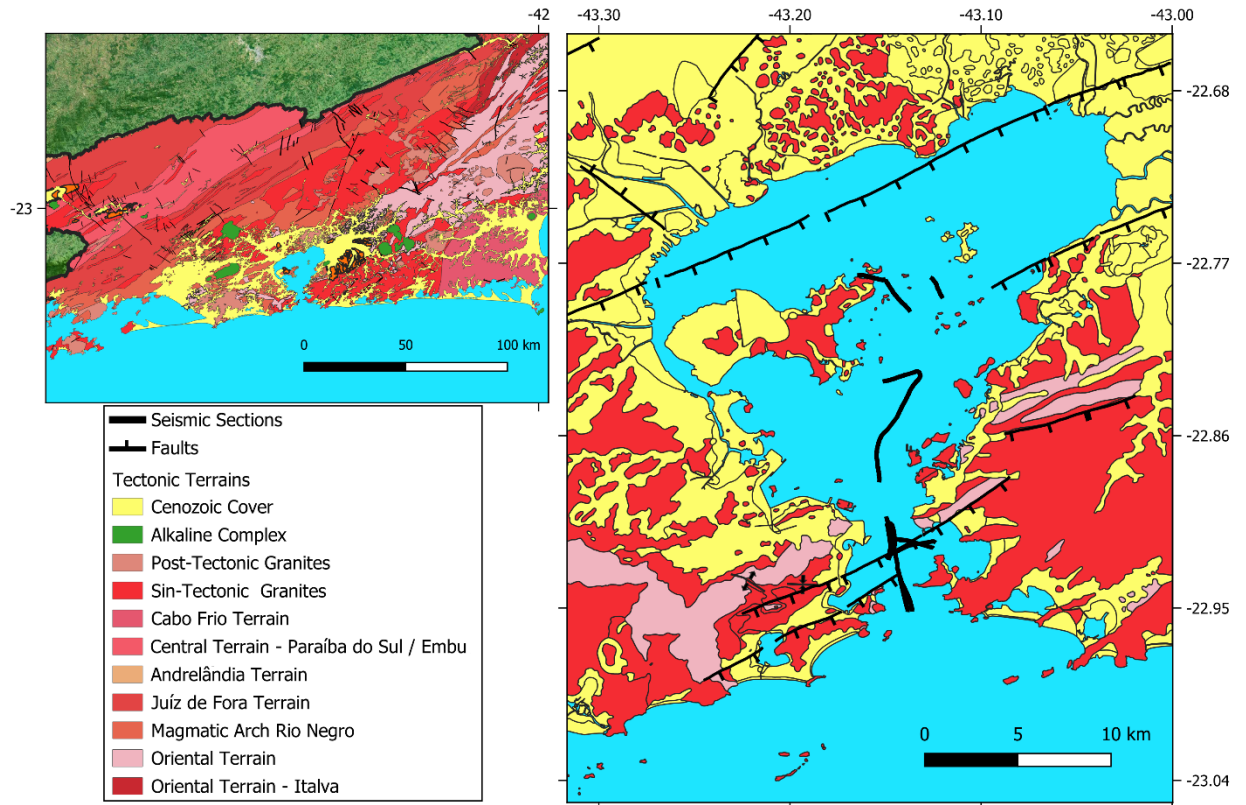


Fig. 1. Location map of multichannel seismic sections at Guanabara Bay overlaid with lithology provided by CPRM institute.

GEOLOGICAL SETTING

Guanabara Graben

The Guanabara Graben is a prominent structure within the CRSB, delineated by Almeida (1976) as the Guanabara Rift, spanning from Sepetiba Bay to Barra de São João. Bordered by the Serra do Mar to the north and coastal massifs to the south, it exhibits depressions with altitudes rarely exceeding 100m, except for alkaline rock massifs reaching nearly 1000m (Ferrari, 1990). Ferrari (2001) identifies four deformation events:

- Event 1 – Sinistral Transcurrent Movement – sigma1 NE-SW direction;
- Event 2 – NW-SE Extension;
- Event 3 – NE-SW Extension with possible NW-SE compression;
- Event 4 – E-W Extension.

Event 1, dating back to the Campanian-Lower Eocene, initiated the graben formation with the sinistral transcurrent movement. Event 2 facilitated the Macacu Basin establishment, followed by Event 3, observed in Macacu Formation sediments. Event 4, characterized by E-W extension, affected the Pleistocene and Holocene periods. Neotectonics spans from Upper Tertiary to Quaternary, according to Obruchev (1948), and it was observed by Ferrari (2001) inside Guanabara Graben.

Ferrari (2001) outlines two graben development phases: Phase 1 controlled contemporary

magmatism and graben implantation, while Phase 2 oversaw Macacu Basin evolution. Phases 3 and 4 caused graben deformation and Macacu Basin segmentation.

Graben implantation involved Japi Planation Surface deformation, beginning in the Paleocene. Macacu Basin formation commenced in the Middle Eocene, evolving into an asymmetrical graben. Neogene activities reshaped Paleogene deposits, leading to Holocene E-W extension.

Sedimentary infilling commenced with lacustrine and alluvial fan deposits of the Macacu Formation, succeeded by fluvial deposits of the Caceribu Formation, marked by a significant erosive unconformity. Guanabara Bay's formation occurred during the last marine transgression, approximately 20,000 BP, with subsequent sea level fluctuations affecting the Guanabara Graben's inundation extent.

Guanabara Bay

Inherited weakness directions of Guanabara Bay's basement are related to tectonic events between Neoproterozoic and Cambrian during the construction process of the Ribeira Belt (Valeriano et al., 2012). These weak directions were reactivated during continental drift and the Atlantic Ocean opening, which is still active.

The basement rocks of Rio de Janeiro are mainly composed of syn-collisional gneisses and granitoids (Heilbron et al., 2020) and belts of metasedimentary rocks composed of shales, sandstones, and carbonates. These rocks originate from a passive paleo-margin, and due to their mineral composition consisting of aluminosilicates coupled with tectonic foliation, they facilitate reactivation at shallow crustal levels, such as in the case of tholeiitic dikes and silicified tectonic breccias filling normal faults.

Around Guanabara Bay, several fractures filled with tholeiitic dikes and zones of brittle fault filled with tectonic breccia are recognized. The tholeiitic dikes have directions ranging from NNE-SSW to NE-SW and thicknesses ranging from centimeters to decameters, as seen in the dike occurring at Itaipu Cliff, which can be observed through satellite imagery. The relationship between the dikes' direction and the basement's foliation is parallel to sub-parallel, indicating that the direction of regional stress is oblique to the direction of basement weakness (Brandão, 2019).

Faults are also controlled by basement preferential direction, parallel to sub-parallel to the foliation. The faults are oriented NE-SW, forming island alignments or even shaping the terrain with displacements of hundreds of meters. These faults are commonly associated with the intrusion of alkaline massive bodies, thus dating from the late Cretaceous to the early Paleogene. Indications of tectonic movement along weathered planes of these faults suggest more recent reactivation, possibly in the Neogene according to regional relationships (Riccomini et al., 2004; Brandão, 2019).

In the city of Niterói, silicified faults stand out in the relief of “Ilhas dos Cardos”, “Pedras de Itapuca” and “Pedra do Índio”, along the shore of Icaraí Beach (Brandão, 2019). In Rio de Janeiro, silicified faults also influence geomorphology, with the Faults of Paineiras being the most well-known. Located on the road with the same name near the entrance of Corcovado, which houses the Christ the Redeemer statue (Silva et al., 1991). At the northern edge of “Morro Cara de Cão”, the basement is

deformed by a silicified fault, which projects towards the rocks supporting the “Forte Tamandaré da Lage” (Valeriano & Magalhães, 1984).

Analyzing regional potential data, it is possible to identify rhomboid shapes in the basement of Guanabara Bay and its surroundings (Gamboa et al., 2021). Guanabara Bay is situated within a well-defined subsiding rhomboid block delineated by its outcropping boundaries. The rhomboid shape may result from shear deformation along inherited basement weakness zones (Gamboa et al., 2021), or it may be the geomorphological result of interaction between Cenozoic faults trending NE-SW and tholeiitic dikes trending NNE-SSW.

The origin of the bay dates to the flooding of a continental depression that housed the paleo-Guanabara River (Amador, 1997), an ancient fluvial valley established in the Pleistocene, when the relative sea level was up to 140m below present levels (Silva et al., 2019). This fluvial valley was flooded by the rise of Atlantic Ocean during the last marine transgression 20,000 BP, which reached up to 5m above present levels 7,000 BP, reaching part of the Baixada Fluminense and the foothills of the Serra do Mar (Amador, 1997), causing the bay to occupy a larger area than at present. The sea level then fluctuates downward until reaching its current level (Silva et al., 2019).

The subsurface of Guanabara Bay shall provide clues about the tectonism in the Guanabara Graben, the continental sedimentation of the graben, and, more recently, with the drowning of the river valley, about its estuarine sedimentation. Estuarine sediments preserve important information about climatic variations, as they are responsible for sea-level fluctuations. Geophysical methods, such as acoustic and potential, are widely used in research and industry for tectonic-sedimentary investigations.

METHODS

We recently acquired 30 km of 2D multichannel seismic lines in Guanabara Bay. The ship "Ciências do Mar III" acquired high-resolution seismic with a streamer with 24 hydrophones, 1 exclusive proximal receiver to record the source signature, and a high-resolution Sparker source, up to 5000Hz. Figure 2 shows the acquisition details, which had the minimum distance between the source and the first hydrophone of approximately 4m, and the spacing between each receiver was 1.5m, resulting in a maximum distance between the source and the last receiver of 36m. The shooting rate was 1s between shots, where each hydrophone recorded 200ms. Data was storage following SEG standards.

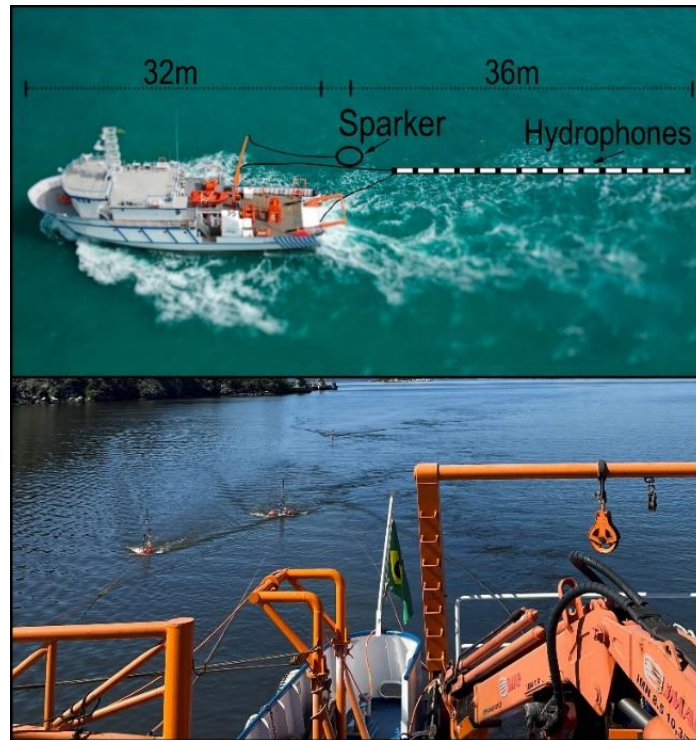


Fig. 2. Seismic acquisition geometry

Marino et al. (2013) present a single-channel processing flow for Guanabara Bay, but multichannel data requires a different processing flow that includes stacking the data from the various hydrophones used in the acquisition. Since this data type is unprecedented for Guanabara Bay, it was necessary to develop a basic multichannel seismic processing sequence (Figure 3) to understand data quality and needs.

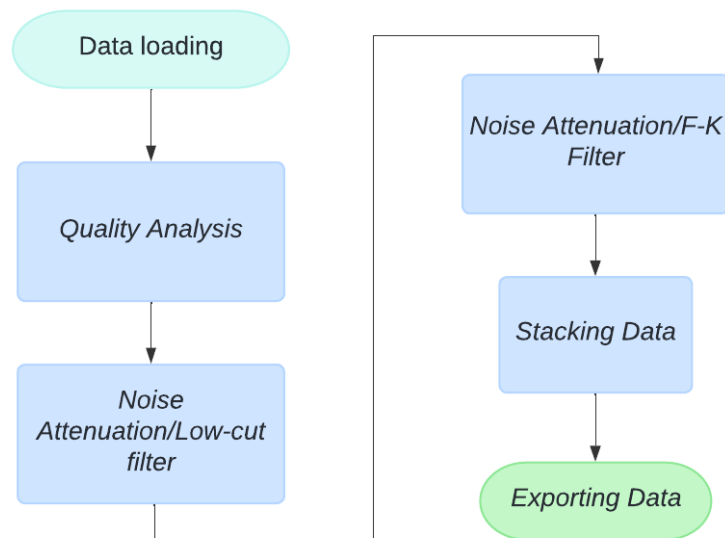


Fig. 3. Seismic processing sequence.

Data processing began with the loading stage and initial quality control. In this stage, it was verified that the main noise source came from the vessel and it was concentrated in relatively low frequencies, from 0 to 200Hz. To attenuate this noise, a high-pass filter with an initial cutoff frequency of 0 and a final at 250Hz was applied, where no signal leakage was observed (Figure 4). Additionally, in this step, quality control of the acquisition geometry was performed through graphical visualization of its geographical coordinates. Next stage was to stack data, where it was observed that reflectors were aligned from the 1st to the 8th channel. So, until the 8th channel, data did not need velocity correction to be stacked, as it was already in phase.

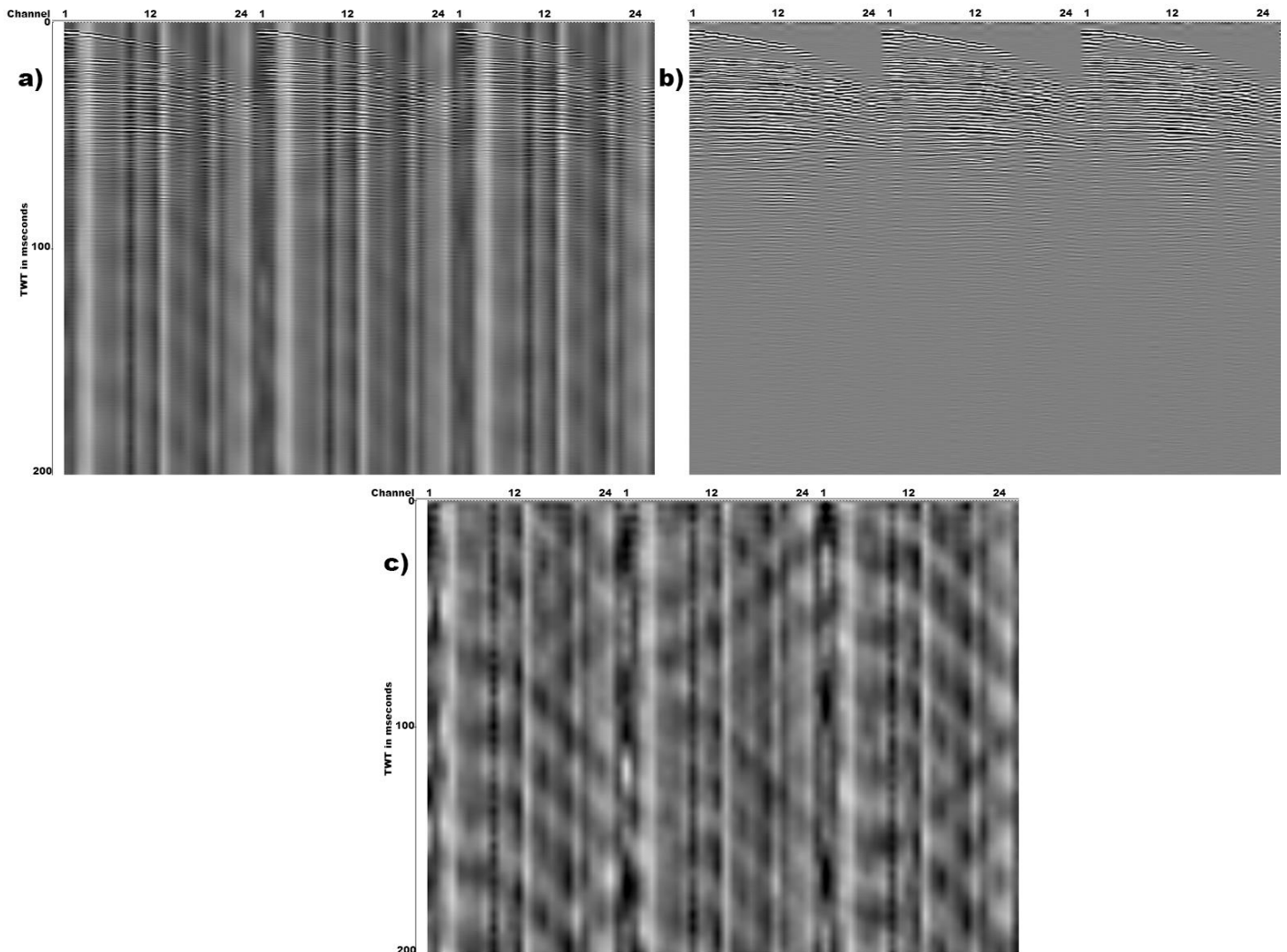


Fig. 4a) Raw shot gathered before the band-pass filter. b) Shot gather after band-pass filter. c) Difference between before and after band-pass filter. This shows that the filtering is not removing any signal, just attenuating noise.

Data stacking stage is crucial for increasing the signal-to-noise ratio and its benefits can be observed

in Figure 5. Seismic was stacked in receiver domain. The firsts 8 channels were summed, resulting in constructive interference of signal and destructive interference of noise. This was the last processing stage which generated greater continuity of seismic reflectors and provided a reliable seismic image.

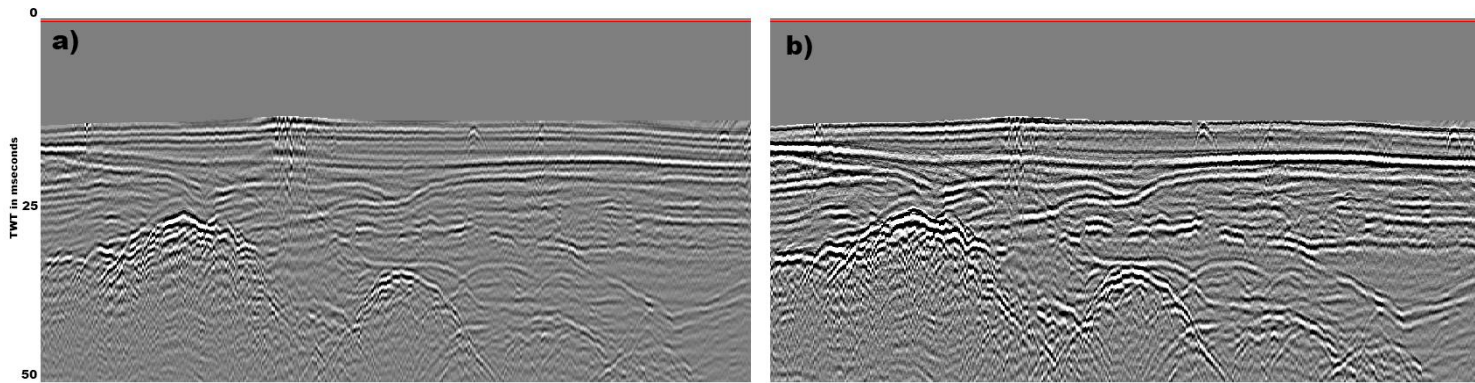


Fig.5. a) Single channel seismic section. b) Multichannel seismic section.

RESULTS

Guanabara Graben implementation commenced in the Paleocene with a sinistral transcurrent NE-SW event. Subsequent tectonic events were extensional, each with distinct orientations. The 2nd event was an NW-SE extension that controlled Macacu Basin establishment and it was followed by a 3rd event, characterized by NE-SW extension. The 4th event, started in the Pleistocene, a E-W extension which deformed the graben and segmented Macacu Basin. (Ferrari, 2001)

Multichannel seismic is crucial for complex geological environments like the Guanabara Graben. The applied seismic processing sequence included frequency filtering, noise attenuation, and data stacking. These processes increased the signal-noise ratio, enabled clearer imaging of faults and sedimentary structures. The complex morphology of the basement, with rounded hilltops, faulted structures, steep slopes, and high reflectivity, produces notable hyperbolas below which no other prominent reflections are observed.

Figure 6 and 7 shows two locations of the seismic sections interpreted in this work. The crystalline basement is the region's most notable geological structure and seismic feature. These two sections represent two distinct basement scenarios. Fig 6 show seismic section 1 location, in which the basement outcrops on Guanabara Bay seabed. Meanwhile, in Fig 7, Section 2 location, basement is deeper.

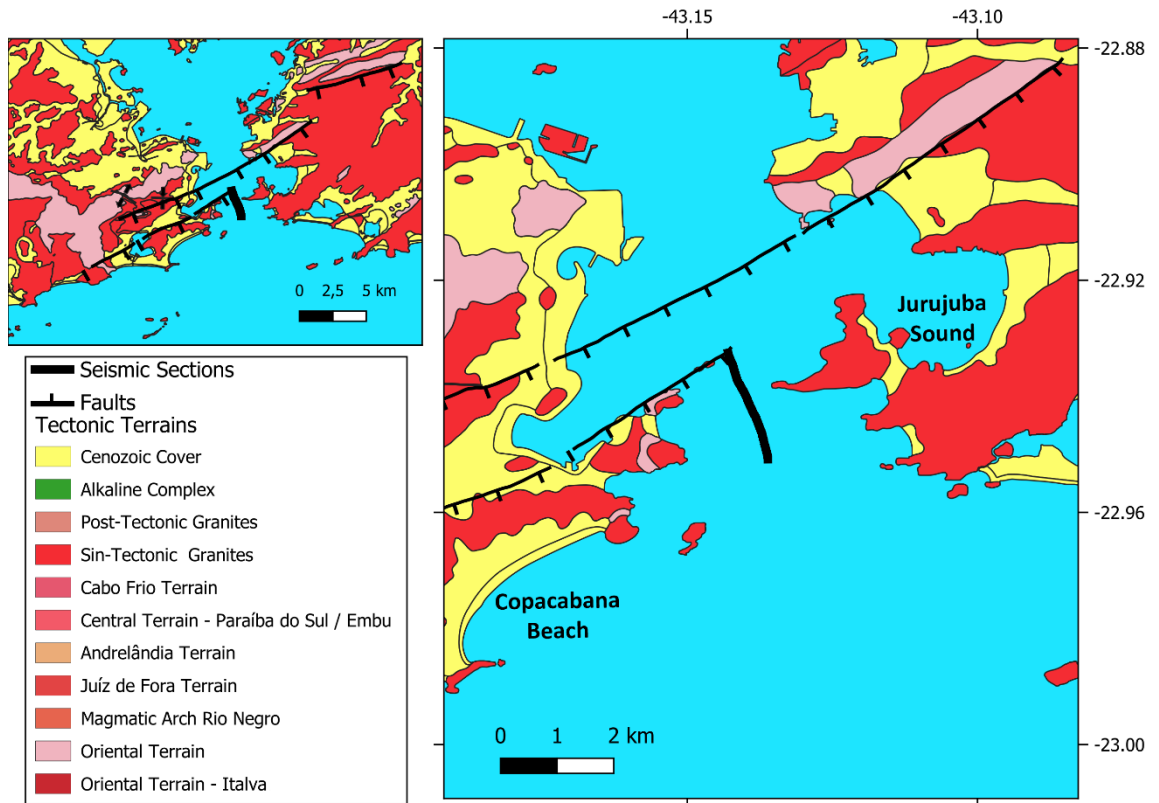


Fig. 6. Seismic section S1 in “Boca da Barra”, in the entrance of Guanabara Bay.

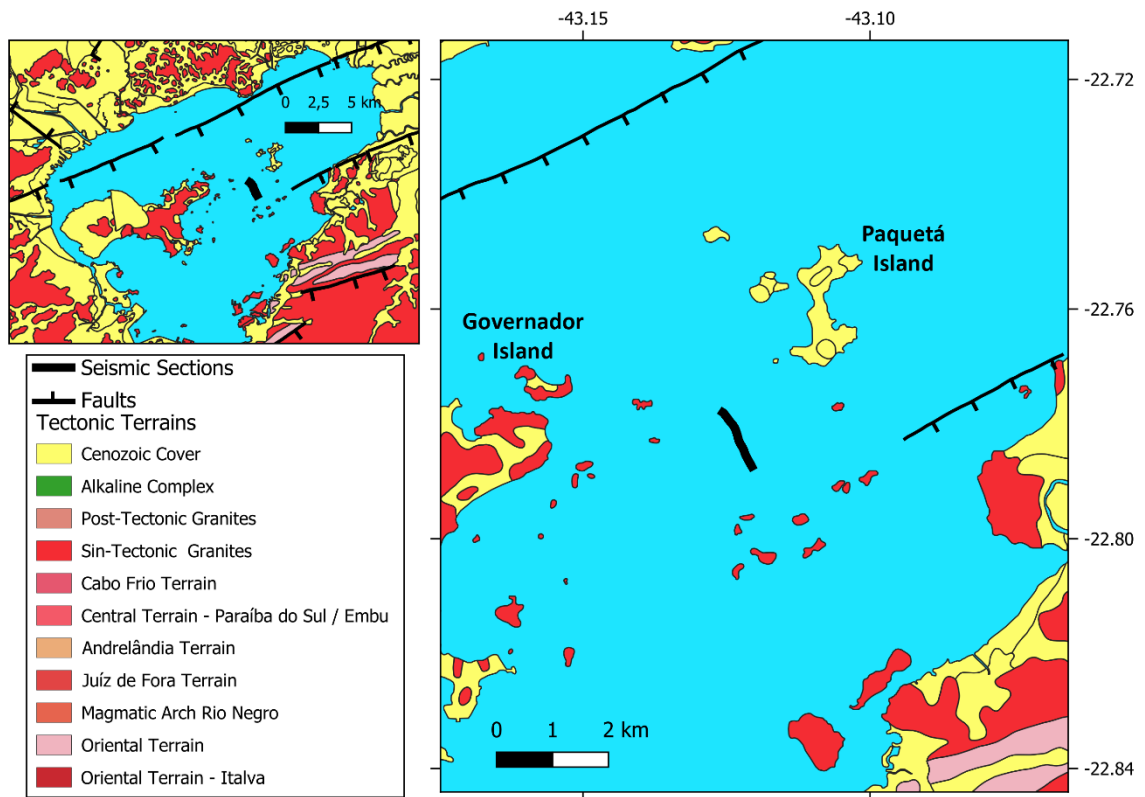


Fig. 7. Seismic section S2 in between Governador Island and Paquetá Island, inner part of the bay.

Four seismic units were mapped. U1 correspond to the basement whilst U2, U3 and U3 represents sedimentary units. Seismic unit U1 represents the crystalline basement and it's marked by a high amplitude contrast, even in deep portions, and for large displacements caused by faulting. In some areas, basement high-slope flanks reflect large portion of the seismic energy to offsets beyond the acquisition range. In this areas U1 may not exhibit a high amplitude character.

Seismic unit U2 represents sediments of Macacu Formation and is marked by the presence of inclined reflectors truncated at the top by an erosive surface. U2 is characterized by the presence of fluvial and alluvial fan sediments, Eocene, and Oligocene continental deposits, deposited 23Ma and exposed until the Pleistocene, giving rise to the angular unconformity at its top. Above Macacu Formation there is U3 with the 2.6Ma deposits of the Caceribu Formation (Silva et al., 2019). The absence of sediments between 23Ma to 2.6Ma suggests an ascensional tendency for Guanabara Graben.

Section S2, Fig 9, we observe that the Caceribu Formation deposits, U3, alternate between flat-parallel patterns to the surface with strong north-south progradation toward the ocean. This sedimentary unit represents the transitional environment between fluvial to estuarine. In the bottom marked by a conglomerate deposit that cover all Macacu Basin. The top of U3 is marked by the recent estuarine deposits of Guanabara Bay, U4. This unit is marked by flat-parallel layers resulted from current lower energy environment.

A total of 6 faults were mapped, they can be observed on both seismic sections S1 and S2. S1 is located near the entrance of the bay and only contains the recent sedimentary unit U4. The older sediments from U2 and U3 were eroded in this area. Therefore, outer portions of Guanabara Bay don't present deformed sediment packages. Meanwhile, S2 presents preservation of older sediments and we can observe deformation of sediments in this section.

In S1 faults are E-W orientation are observed and produce the basement to abruptly shift along this section. We noted two normal faults dipping to the ocean and one normal fault with opposite dip. The basement faults of Guanabara Graben are related to Event 1 and 2. Event 1, sinistral transcurrent NE-SW, which occurred between 80-50Ma was originated by a sinistral transcurrent NE-SW deformation. Event 2, recent than 50Ma, a NW-SE extension that influenced basement and the sedimentation of Macacu Formation, not present in this section.

In central part of S2 we observe Macacu Formation sediments, U2, trapped among a negative flower structure. The flower structure is related to Guanabara Graben Event 1, a sinistral transcurrent movement. U2 sedimentation occurs during Event 2 and 3, NW-SE and NE-SW extensions, which tilt U2 and produce the angular unconformity between U2 and U3. The sediments from Caceribu Formation, U3, are curved to the east flank fault of the flower structure. The top of Caceribu is marked by the last marine regression between 120,000 and 20,000 BP. This indicates neotectonics activity inside Guanabara Graben previous to the recent estuarine environment.

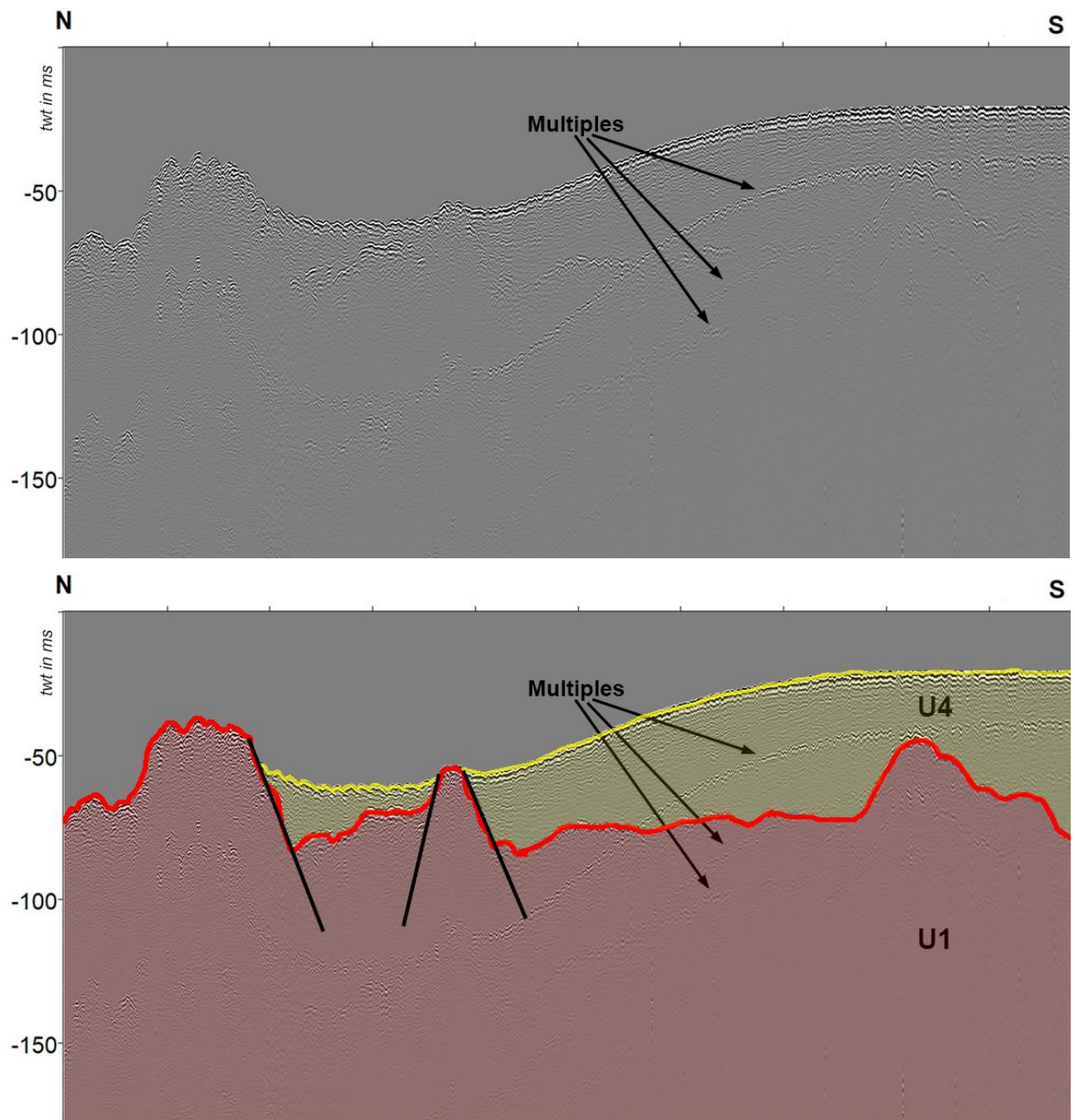


Fig. 8. Not interpreted and interpreted Seismic Section 1. Section parallel to the talweg located at the entrance of the bay near “Boca da Barra”. High erosion is observed at this location as this section only contains recent sediment deposits. First and second order water bottom multiple, and basement multiple can be observed. Three normal faults are interpreted.

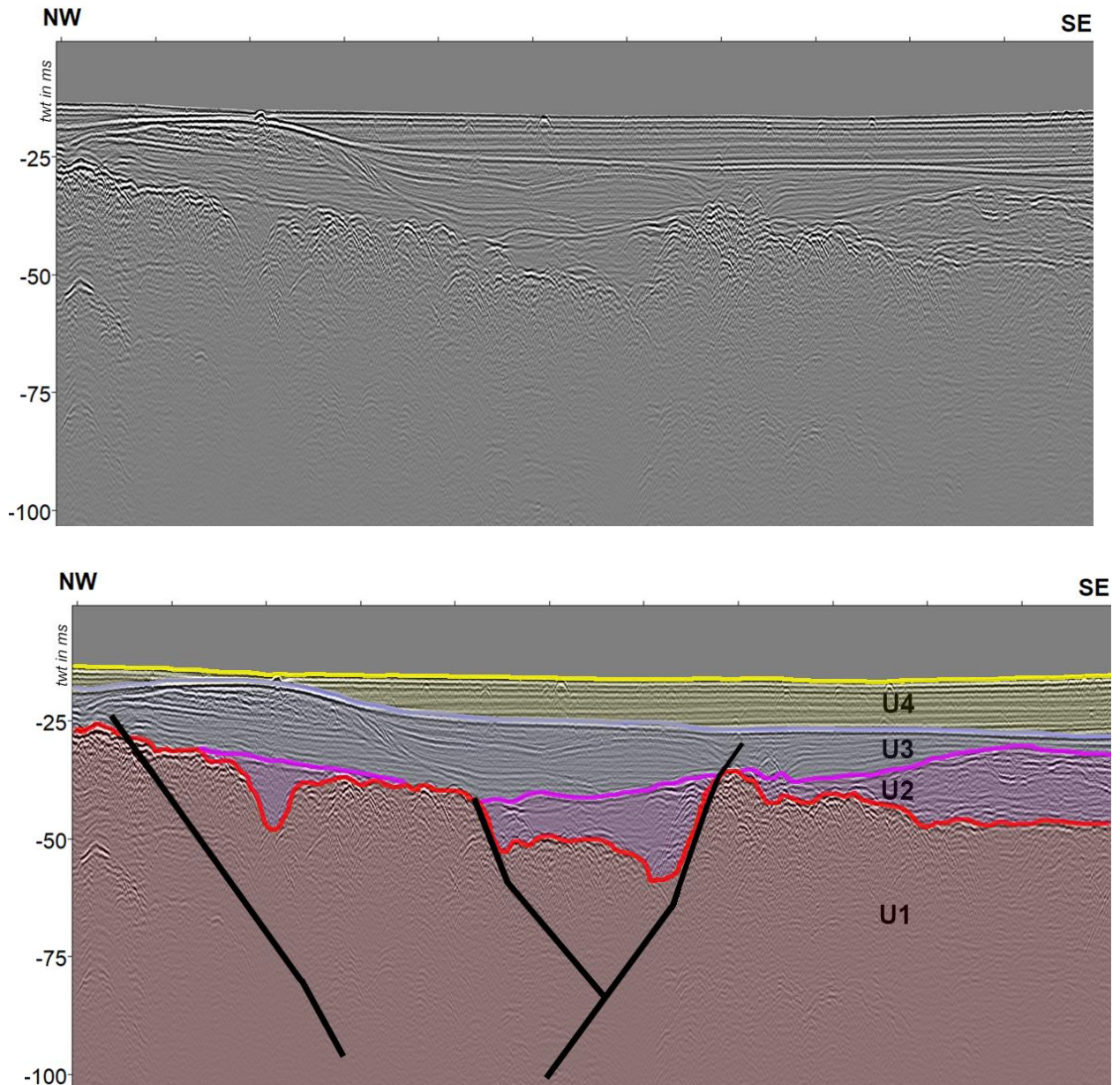


Fig. 9. Seismic section S2 is in an internal part of the bay between Paquetá Island and Governador Island. Normal faults and negative flower structure can be observed. The deformation of U3 sediments on the eastern flank of the flower structure evidences neotectonics activity within Guanabara Graben.

The observed tectonics features are aligned with formerly mapped faults by CPRM in the continent, which can be observed in Fig 1, 6 and 7. In seismic sections S1 and S2 we observe continuity of the faults from the continent to the bay area. The interpreted tectonic features are result from a combination of transcurrent with extensional movements that could also be observed trough magnetic data on Fig 10. The combination of them makes Guanabara Graben to be a tectonic province of rhombohedral deformation. Which is associated with the continental origin of the Rio de Janeiro Oceanic Fracture Zone (RJOFZ), characterized by corridors of strike-slip faults that produced the rhombohedral structures of brittle deformation observed in the magnetic record of Fig 10.

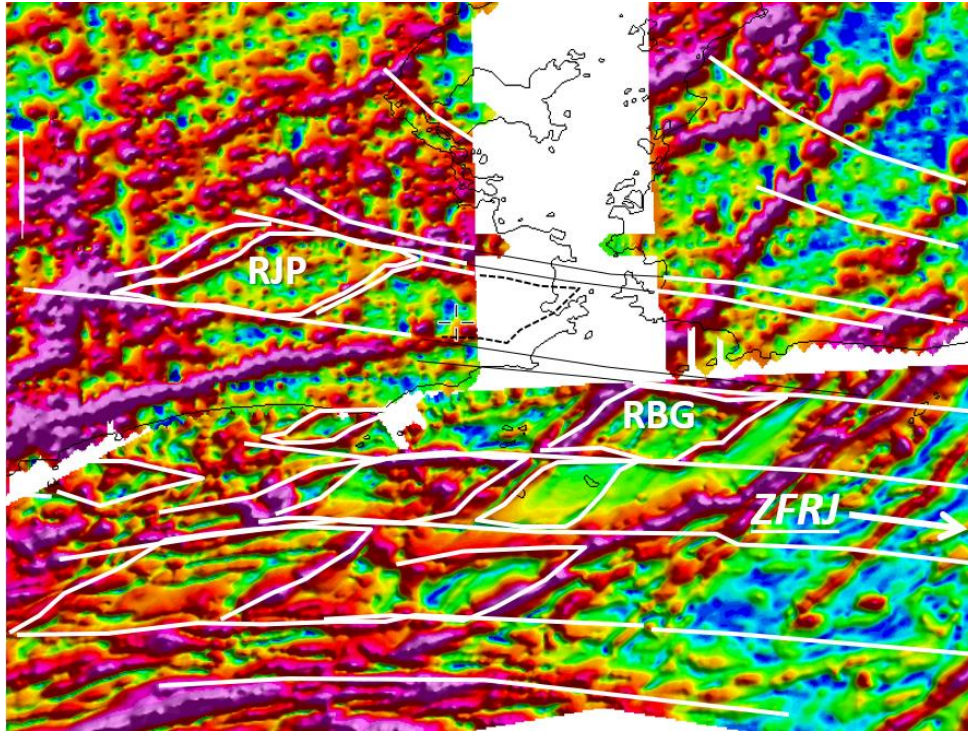


Fig. 10. Magnetic Data of Guanabara Bay. RJP and RBG - rhombhedra of Jacarepaguá and Guanabara Bay. Possible blocks displaced by transpression bounded by strike-slip fault zones.

CONCLUSIONS

Multichannel seismic data has proven to be precise in highlighting geological structures in Guanabara Bay. Currently, we process data using only the first eight channels of the acquisition. To enhance our analysis, we should develop a seismic processing flowchart that encompasses all 24 channels, consider moveout corrections, and create a velocity model for data migration. This approach would allow the stacking of more traces and increase the signal-to-noise ratio.

Basement normal faults and the negative flower structure can be associated with the first two paleotensional fields of the Guanabara Graben. Event 1 involved a sinistral transcurrent movement with a NE-SW orientation that occurred between 80 and 50 million years ago (Ma). Event 2, which is more recent than 50 Ma, involved NW-SE extension, influencing the basement and causing the tilt of Macacu Formation sediments. The angular unconformity and age discrepancy between the Macacu and Caceribu Formations indicate an ascensional movement of the Guanabara Graben between 23 Ma and 2.6 Ma. The Holocene deposits of the Caceribu Formation exhibit significant deformation against the flank of the flower structure, indicating neotectonics activity within the Guanabara Graben.

The high-resolution multichannel seismic sections of Guanabara Bay highlight transcurrent and extensional tectonics, corroborated by rhombhedral structures observed in magnetic records. The visualization of these tectonic structures is unprecedented through seismic imaging in Guanabara Graben and is in line with what was mapped using direct methods by others studies in other portions of

the graben. Neotectonics activity observed in the southern parts of the Continental Rift of Southeastern Brazil and also in other parts of the graben aligns with the evidence from Guanabara Bay seismic sections, demonstrating both local and regional nature of the tectonic processes.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra of Universidade Federal Fluminense. Special thanks to the *Ciências do Mar III* and the acquisition crew.

Data and Materials Availability

The data used in the manuscript should be open and publicly available whenever possible. If appropriate, BrJG encourages authors to archive data in a permanent repository. The data deposited should be cited in the manuscript's reference list using the DOI or other persistent identifiers.

REFERENCES

- Almeida, F. F. M. D., 1976. The system of continental rifts bordering the Santos Basin. *An. Acad. Bras. Ci.*, Rio de Janeiro, 58 (suplemento): 15-26.
- Almeida, H. M. F. & Carneiro, C. D. R. 1998. Origem e evolução da Serra do Mar. *Rev. Bras. Geoc.*, São Paulo. Anais, p. 423-428.
- Amador, E.S., Paixão, R.A.; Paiva, V.D.O., Seixas, N.J., 1976, Considerações preliminares sobre os depósitos pré-afogamento da Baía de Guanabara. *Resumo das Comunicações do XXIX Congresso Brasileiro de Geologia*: 139-140.
- Amador, E.S., Paixão, R.A.; Paiva, V.D.O., 1978, O Pleistoceno Superior da região da Baía de Guanabara. *An. Acad. Bras. Ciênc.* 50 (1): 125.
- Amador, E.S., 1997, Baía de Guanabara e ecossistemas periféricos: homem e natureza. Rio de Janeiro: INTERCIÊNCIA, 539 pp.
- Angulo, R.J.; Lessa, G.C.; Souza, M.C.S., 2006, A critical review of mid-Late Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline. *Quaternary Science Reviews*, v. 25, n. 5-6, p. 486-506.
- Baptista Neto, J. A., da Silva, M. A. M., & Figueiredo Jr, A. G. - 1996 - Sísmica de alta frequência e o padrão de distribuição de sedimentos na enseada de Jurujuba (Baía de Guanabara) - RJ/Brasil - *Revista Brasileira de Geofísica* 14(1): 51-57.
- Bellefleur, G., Duchesne, M. J., Hunter, J., Long, B. F., & Lavoie, D. (2006). Comparison of single-and multichannel high-resolution seismic data for shallow stratigraphy mapping in St. Lawrence River estuary, Quebec. *Geol. Surv. Can. D*, 2, 1-10.
- Brandão, D. R. 2019. Evolução estrutural da borda sul do Gráben da Guanabara. Dissertação de Mestrado, UERJ. 168p.
- De Martonne, E. 1944. Problemas morfológicos do Brasil tropical atlântico. *Rev. Bras. Geogr.* Ano V, n.4: 523-549.
- Dias, M. S., Carnevale, M. V., Dias, G. T., Bispo, L., Bonardi, M., & de Veneza, I. (2005). Sismo-estratigrafia do holoceno na Baía de Guanabara: porção ao norte da ilha do Governador. In *Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário—ABEQUA* (Vol. 10).
- FERRARI, A. L. (1990). A geologia do "rift" da Guanabara (RJ) na sua porção centro-ocidental e sua

relação com o embasamento Pré-Cambriano. In Congresso Brasileiro de Geologia (Vol. 36, No. 1990, pp. 2813-2826).

Ferrari, 2001, Evolução tectônica do Graben da Guanabara, 2001, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 423 pp.

Galvão, A., 2014, Distribuição Superficial de Sedimentos e Arranjo Sismoestratigráfico, NE da Baía de Guanabara - RJ. Dissertação de Mestrado, Programa de PósGraduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, Universidade Federal Fluminense, 134 pp.

Gamboa, L. A. P., Ferraz, A. E. P. P. D., Rosas, R., O., Brandão, D. R. & Ferrari, A. L. FEIÇÕES ROMBOÉDRICAS NO EMBASAMENTO CRISTALINO E A ORIGEM DA BAIA DE GUANABARA, p 29.

Lima, M. R., Cabral Junior, M. & Stefani, F. L. 1996. Palinologia de Sedimentos da Formação Macacu – Rife da Guanabara, Terciário do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *An. Acad. Bras. Ci.*, Rio de Janeiro, 68 (4): 531-543.

Marino, I. K., Santos, M. A. C., & Silva

, C. G. (2013). Processing of high-resolution, shallow seismic profiles, Guanabara Bay-Rio de Janeiro State, Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*, 31(4), 579-594.

Meis, M. R. M. & Amador, E. S. 1972. Formação Macacu: Considerações a respeito do Neo-Cenozóico da Baía de Guanabara. *An. Acad. Bras. Ci.*, Rio de Janeiro, 44(3/4):602.

Meis, M. R. M. & Amador, E. S. 1977. Contribuição ao estudo do Neocenozóico da Baixada da Guanabara: Formação Macacu. *Rev. Bras. Geoc.*, São Paulo, 7 (2): 124-150.

Obruchev, V. A. (1948). Main features of kinetics and plastics of neotectonics. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Ser. Geol*, (5), 13-24.

Quaresma, V. S., Dias, G. T. M., & Baptista Neto, J. A. (2000). Caracterização da ocorrência de padrões de sonar de varredura lateral e sísmica de alta frequência (3, 5 e 7, 0 kHz) na porção sul da Baía de Guanabara-RJ. *Revista Brasileira de Geofísica*, 18, 201-214.

Reis, A.T.; Maia, R.M.C.; Silva, C.G.; Rabineau, M.; Guerra, J.V.; Gorini, C.; Ayres, A.; Arantes-Oliveira, R.; Benabdellouahed M., Simoes, I.; Tardin, R. 2013. Origin of step-like and lobate seafloor features along the continental shelf off Rio de Janeiro State, Santos basin-Brazil. *Geomorphology*.doi: 0.1016/j.geomorph.2013.04.037

Riccomini, C. 1989, O Rif continental do sudeste do Brasil. São Paulo, 256p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade São Paulo.

Riccomini, C., Sant'Anna, L.G., Ferrari, A.L., 2004. Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: Mantesso Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito-Neves, B.B. (Eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, São Paulo, SP, pp.383–405.

Ruellan, F. A. 1944, Evolução Geomorfológica da Baía de Guanabara e das Regiões vizinhas. *Revista Brasileira de Geografia*, n. 4, p. 445-508.

Silva, C. G., dos Reis, A. T., Goiana, L. T. C. A., & Ferrari, A. L. A HISTÓRIA DO PREENCHIMENTO SEDIMENTAR DA BAÍA DE GUANABARA ATRAVÉS DA GEOFÍSICA. GUANABARA BAÍA DE, p 47.

Silva, L.G., Nava, D.B., Heilbron, M., Valeriano, C.M. 1991. Geologia de detalhe da Serra da Carioca, Cidade

Valeriano, C.M., & Magalhães, A. C. (1984). Geologia estrutural de área do Pão de Açúcar e

adjacências, Rio de Janeiro, Brasil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 56(3), 295-301.

Valeriano, C. D. M., Porto Junior, R., Almeida, J. C. H., Silva, L. G. E., Duarte, B., Schmitt, R., ... & Heilbron M. 2012. Geologia e recursos minerais da folha Baía de Guanabara SF. 23-ZB-IV. CPRM.

Yilmaz, Ö. 2001. Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data.

Society of exploration geophysicists.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados sísmicos multicanais provaram ser precisos em destacar estruturas geológicas na Baía de Guanabara. Atualmente, processamos dados usando apenas os primeiros oito canais da aquisição. Para aprimorar nossa análise, devemos desenvolver um fluxograma de processamento sísmico que abranja todos os 24 canais, considerar correções de moveout e criar um modelo de velocidade para a migração dos dados. Essa abordagem permitiria o empilhamento de mais traços e aumentaria a relação sinal-ruído.

As falhas normais no embasamento e a estrutura em flor negativa podem ser associadas aos dois primeiros campos de tensão paleo do Graben de Guanabara. O Evento 1 envolveu um movimento transcorrente sinistral com orientação NE-SW que ocorreu entre 80 e 50 milhões de anos atrás (Ma). O Evento 2, mais recente que 50 Ma, envolveu uma extensão NW-SE, influenciando o embasamento e causando a inclinação dos sedimentos da Formação Macacu. A discordância angular e a discrepância de idade entre as Formações Macacu e Caceribu indicam um movimento ascensional do Graben de Guanabara entre 23 Ma e 2,6 Ma. Os depósitos holocênicos da Formação Caceribu exibem deformação significativa contra o flanco da estrutura em flor, indicando atividade neotectônica dentro do Graben de Guanabara.

As seções sísmicas multicanais de alta resolução da Baía de Guanabara destacam tectônicas transcorrentes e extensionais, corroboradas por estruturas romboidais observadas em registros magnéticos e também por levantamentos diretos feitos por outros trabalhos no Gráben da Guanabara. A atividade neotectônica observada nas partes sul do Rift Continental do Sudeste do Brasil alinha-se com as evidências das seções sísmicas da Baía de Guanabara, assim como em outras porções do gráben, demonstrando a natureza regional dos processos tectônicos dentro das bacias do CRSB.

Para trabalhos futuros fica a necessidade de desenvolver um fluxo de processamento sísmico multicanal mais robusto para a região. Que incorpore a utilização dos 24 canais, aplique diferentes deconvoluções afim de remover a assinatura da fonte e o efeito da bolha. Por fim, que construa um modelo de velocidade com o objetivo de migrar o dado para posições fidedignas a realidade geológica. A partir dessas novas imagens, correlacionar o tectonismo e a sedimentação do Graben da Guanabara ao longo da margem continental adjacente e com porções Norte da Bacia de Santos.