



Universidade Federal Fluminense

Instituto de Geociências

Departamento de Geologia e Geofísica

Graduação em Geofísica

João Victor Moraes da Costa Anjos

**ANÁLISE DA DSTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS SUPERFICIAIS NA
PLATAFORMA CONTINENTAL DO CEARÁ UTILIZANDO ATRIBUTOS
SÍSMICOS**

Niterói,RJ

2019

João Victor Moraes da Costa Anjos

**ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS SUPERFICIAIS NA
PLATAFORMA CONTINENTAL DO CEARÁ UTILIZANDO ATRIBUTOS
SÍSMICOS**

Monografia apresentada ao curso de Bacharelado em Geofísica, como parte da Disciplina Projeto Final II e requisito para a obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cleverson Guizan Silva - UFF

Prof. Dr. Arthur Ayres Neto - UFF

Prof.Dr. José Antonio Baptista Neto - UFF

Niterói,RJ

2019

Agradecimentos

Sempre gostei de ler esta seção nas dissertações, não apenas por acreditar que agradecer é algo fundamental, mas também para olhar além de um simples texto científico e reconhecer o ser humano por trás de tudo isso.

Início os meus agradecimentos pelas pessoas que mais admiro no mundo, meus pais. Um casal de professores que desde cedo além de alimentarem esse meu fascínio pela Terra, me lembravam de uma coisa muito mais importante: ser feliz fazendo isso. Essa conquista é de vocês também

Em seguida, mas não menos importante, gostaria de agradecer a toda minha família, especialmente o pessoal do Monteiro, tias e avós queridas as quais serei eternamente grato.

Não chegaria aqui se não tivesse amigos, ainda mais esses que estão presentes em quase todos os momentos da minha vida. Um forte agradecimento a esses camaradas, João Paulo, Merquior, Tostes, Diguinho, Ribeirinho, Suetham e Quintanilha. Sem eles, não passaria por todo esse estresse da Geofísica dando risada. Não obstante a isso, gostaria de agradecer também aos eternos colegas que tive o prazer de conhecer e dividir de ótimos momentos dentro e fora da UFF, são eles: Tone, Lorena, Julia Schreiber, Juliana Fernandes, Murilo, Julia Machado, Mateus, Moreno, Sophia, Luana entre outros.

Falando ainda da UFF, gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Cleverson Guizan, pela oportunidade dada e também por toda atenção e ajudas prestadas na elaboração desse trabalho. Gostaria de agradecer também em especial aos professores, Rogério Araújo, Antônio Freire, José Antônio, Arthur Ayres e Eliane Alves pelas excelentes aulas ministradas e por todo o carinho a graduação.

Na UFF também tive a oportunidade de conhecer uma pessoa muito especial que além de melhor amiga, não tenho vergonha nenhuma de escrever aqui que é namorada também. Essa pessoa é a Amanda Bourguignon. Não

estaria aqui terminando uma graduação em geofísica se não fosse por ela, meu porto seguro. Obrigado por me fazer ir mais longe e me mostrar o mundo além dessas obrigações de faculdade/trabalho. Por trás da Amanda, também se esconde uma família muito especial pela qual tenho muito apreço e que sempre me proporcionou ótimos momentos. Um forte abraço a todos os Bourguignons, em especial a sua mãe Inês e aos primos Diego, Graziela e Bruno.

Não poderia deixar de agradecer a *Eliis*, por além de disponibilizar licenças do *PaleoscanTM* para a realização deste trabalho, me dar a oportunidade do estágio e despertar em mim a paixão pela interpretação sísmica. Em especial, gostaria de agradecer aos meu colegas de escritório aqui no Brasil, Marcus Alves, Marcelo Medeiros e Loeiza Gicquel por toda simpatia, irreverência e excelentes momentos de aprendizado que vivencio até hoje. Aproveitando também gostaria de mandar um forte abraço para a galera de Montpellier, Sven Phillit, Nicolas Daynac e Sebastien Lacaze que sempre demonstraram prontidão e simpatia em ajudar.

Por fim, gostaria de agradecer a empresa *Premier Oil* pelo auxílio de bolsas para o desenvolvimento do projeto e a empresa TGS e a ANP pelo fornecimento das linhas sísmicas 2D, imprescindíveis para este estudo.

RESUMO

A plataforma continental brasileira caracteriza-se por extensas áreas com sedimentação carbonática de origem biogênica, abrigando grande variedade de vida marinha bentônica e livre. Situada entre os meridianos 41° W e 38° W e as latitudes 4°S e 2°S, a região de análise situa-se na plataforma continental do Estado do Ceará. Possui uma área de aproximadamente 13.000 km² entre os rios Jaguaripe e Acaraú, entre profundidades de 20 a 100m. O objetivo do presente trabalho foi desenvolver uma metodologia visando utilizar o dado sísmico de reflexão 2D, para fazer uma classificação automática do tipo de fundo, com base na análise de atributos sísmicos. A partir de dados batimétricos de folhas de bordo e dados de granulometria e teor de carbonatos compilados no Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) da Marinha do Brasil foram construídos os mapas base de batimetria detalhada e de fácies sedimentares. Esses dados foram posteriormente correlacionados com os atributos sísmicos buscando-se verificar a relação entre a resposta do sinal refletido com o tipo de fundo. Os resultados demonstram que os atributos de frequência instantânea e impedância acústica relativa apresentaram boa correlação com o teor de carbonato e de cascalho respectivamente. A conjugação destes dois atributos espacialmente com a informação batimétrica da plataforma mostrou ainda a coincidência dos valores anômalos destes dois atributos, com altos batimétricos nas proximidades de canais submarinos, o que nos sugere a presença de fundos com construções biogênicas. Os esforços para trabalhos futuros, como coleta de amostras e outras técnicas de investigação direta e indireta podem utilizar os resultados deste projeto para escolha dos locais de pesquisa detalhada minimizando esforços amostrais e reduzindo custos.

Palavras Chave: Atributos sísmicos, Bacia do Ceará, Análise sísmica, Plataforma Continental

ABSTRACT

The Brazilian continental shelf is characterized by extensive areas with carbonate sedimentation of biogenic origin, sheltering a great variety of benthic and free marine life. Located between the meridians 41° W and 38° W and latitudes 4° S and 2° S, the analysis region is located in the continental shelf of Ceará State. It has an area of approximately 13,000 km² between the Jaguaripe and Acaraú rivers, between depths of 20 to 100m. The aim of the present work was to develop a methodology to use 2D reflection seismic data to automatically classify the background type based on seismic attribute analysis. From bathymetric data of navigation board and data of granulometry and carbonate content compiled in the Brazilian National Oceanographic Data Bank (BNDO), the base maps of detailed bathymetry and sedimentary facies were constructed. These data were subsequently correlated with the seismic attributes seeking to verify the relationship between the reflected signal response and the background type. The results show that the instantaneous frequency and relative acoustic impedance attributes showed a good correlation with the carbonate and gravel content respectively. The combination of these two attributes spatially with the bathymetric information of the platform also showed the coincidence of the anomalous values of these two attributes, with high bathymetric near the submarine channels, suggesting the presence of backgrounds with biogenic constructions. Efforts for future work such as sample collection and other direct and indirect investigation techniques can utilize the results of this project to choose detailed research sites minimizing sampling efforts and reducing costs.

Keywords: Seismic Attributes, Ceará Basin, Seismic Analysis, Continental Shelf

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização e limites da área de estudo.-----	12
Figura 2: Mapa de distribuição de correntes permanentes na região Nordeste do Brasil. CNB: Corrente Norte Brasileira (Freire & Cavalcanti, 1998).-----	13
Figura 3: Esquema da classificação do assoalho marinho, mostrando seus principais aspectos morfológicos. Adaptado da Comissão Interministerial para Recursos do Mar- CIRM.-----	14
Figura 4: Mapa da distribuição de sedimentos na Plataforma Continental do Ceará. Modificado por Freire (1985) e Freire & Cavalcanti (1998).-----	16
Figura 5: Mapa da distribuição de espécies de Algas na plataforma continental brasileira (Caranante, 1988).-----	20
Figura 6: Esquema básico de aquisição de dados sísmicos de reflexão. Modificado de Evans, 1997 apud Kearey, 2009.-----	23
Figura 7: Esquema de interação e propagação da onda sísmica em sedimentos e rochas. Retirado de Jakobsson et al, 2016)-----	24
Figura 8: Classificação de atributos sísmicos pelas suas propriedades (Chen e Sidney, 1997; Brown, 2011, p. 284. Retirado de Barners, 2016).-----	25
Figura 9: Fluxo de trabalho realizado.-----	30
Figura 10: Mapa da área de estudo contendo todas as linhas sísmicas 2D-----	31
Figura 11: Modelo de Shepard simplificado a esquerda e modelo de Lassoneur utilizado a direita-----	32
Figura 12: Mapa de distribuição de sedimentos gerado na zona de estudo a partir dos modelos de classificação de Shepard e Lassoneur-----	33
Figura 13: Mapa batimétrico gerado na zona de estudo-----	34
Figura 14: Linha sísmica com o fundo do mar interpretada da região de estudo -----	35

- Figura 15:** Histogramas os dados de sedimento e os dados de atributos sísmicos em diferentes conjuntos amostrais de busca-----40
- Figura 16:** Curvas de frequência acumulada para os dados de sedimento e atributos sísmicos em diferentes conjuntos amostrais de busca-----41
- Figura 17:** Mapa mostrando a diferença entre os dados Fulstack e dados Zero-Offset, sendo cores quentes mostrando as maiores zonas de diferenças entre eles e cores mais escuras mostrando uma diferença bem próxima de zero.----42
- Figura 18:** -Superfície relativa ao fundo do mar com a aplicação do atributo sísmico de fase instantânea-----43
- Figura 19:** Sobreposição da superfície relativa ao fundo do mar com o atributo sísmico de fase instantânea com um mapa batimétrico.-----44
- Figura 20:** Superfície relativa ao fundo do mar com a aplicação do atributo sísmico de frequência instantânea-----45
- Figura 21:** Sobreposição do mapa de frequência instantânea com as principais feições de distribuição de sedimento geradas na mesma região.-----45
- Figura 22:** Tabela mostrando as principais correlações encontradas e seus respectivos valores de p-valor-----46
- Figura 23:** Mapa de sobreposição de anomalias onde foi possível identificar 4 áreas com possíveis construções biogênicas-----48

Sumário

Introdução	10
Objetivos	11
Área de Estudo	12
1.1 Localização da Área	12
1.2 Aspectos Oceanográficos e Climáticos	12
1.3 A Plataforma Continental	14
1.4 Aspectos da Plataforma Continental do Ceará	14
1.5 Evolução Tectônica	20
Revisão teórica	22
2.1 O método sísmico de reflexão	22
2.2 Atributos sísmicos	24
Metodologia	29
3.1 Carregamento dos dados e criação do projeto	31
3.2 Intepretação sísmica do Fundo do mar (Full Stack+ Near Trace)	35
3.3 Geração dos atributos sísmicos	36
3.4 Correlação dos dados com as amostras de fundo	37
Resultados	38
4.1 Análise Estatística Dados de sedimento	38
4.2 Discrepâncias dados <i>NearTrace</i>	42
4.3 Anomalias Atributos sísmicos	43
4.4 Correlações Dados Sedimentos X Atributos Sísmicos	45
4.5 Construção modelo final e mapeamento das construções biogênicas	48
Conclusões	49
Referências bibliográficas	50

Introdução

A plataforma continental brasileira destaca-se como uma grande extensão latitudinal, que em termos gerais pode ser classificada por uma amálgama de extensas planícies submersas, baixas profundidades e uma grande variedade de vida marinha bentônica e livre.

Destacam-se como prerrogativas para esse estudo, a necessidade de otimizar e integrar fluxos de trabalho regionais ligados a análise do sedimento do fundo marinho. Através da utilização de métodos sísmicos, comumente utilizados pela indústria na exploração de hidrocarbonetos, obtém-se uma reposta do fundo marinho que diante de análises estatísticas pode-se chegar a relações com os tipos de sedimentos encontrados na área de estudo.

Utilizando de atributos sísmicos, espera-se analisar a de forma mais completa a resposta de interação dos sedimentos do fundo e onda refletida registrada.

O desenvolvimento desse projeto não vem como uma forma de substituir métodos de análise já concretizados na indústria, mas sim em pensar em práticas que de certa possam agregar e otimizar a análise de riscos ambientais nesses outros metodologias clássicas.

Objetivos

O objetivo central deste trabalho visa contribuir para uma melhor avaliação da distribuição de sedimentos superficiais no fundo marinho aproveitamento de dados sísmicos 2D presentes em quase toda a plataforma continental brasileira.

Como objetivos específicos são apontados:

- I. Geração de mapas regionais de distribuição de sedimentos, a partir de anomalias mapeadas com atributos sísmicos
- II. A analisar o grau de correlação dos sedimentos superficiais marinhos com suas respectivas respostas nos atributos sísmicos e determinar quais obtiveram as melhores respostas
- III. Com base nos mapas apresentados, definir possíveis zonas de construções biogênicas

1 Área de estudo

1.1 Localização da Área

Situada entre os meridianos 41° W e 38° W e as latitudes 4° S e 2° S, a área de análise localiza-se no contexto na margem equatorial Atlântica, mais especificamente no setor da plataforma continental do Estado do Ceará. Possui uma área de aproximadamente 13 mil quilômetros quadrados compreendida entre os Rios Jaguaripe e Acaraú de profundidades variando entre 20 a 100m.

Na zona da Plataforma Continental, é possível notar duas distintas orientações da plataforma na zona de estudo. Uma de orientação W-E de aproximadamente 85 km de espessura e outra de orientação NW-SE com espessura de 48 km.



Figura 1- Localização e limites da área de estudo.

1.2 Aspectos Oceanográficos e Climáticos

1.1.1 Clima, temperatura e salinidade dos oceanos

Com altas taxas de insolação graças a sua proximidade com a linha do Equador, a costa Cearense possui um regime climático semiárido, com temperatura média anual $26,7^{\circ}$ C e umidade relativa 78,8% (INMET,2018). A pluviosidade média anual é de 1440mm e concentra-se durante os meses de fevereiro e maio (Silva Filho, 2004). Nesses períodos mais chuvosos a

temperatura das águas superficiais é de 27 à 28° C, enquanto nos meses mais secos chega a valores mais elevados de 27-29°C. Essa diferença é devida a menor incidência de raios solares neste período ocasionados por um período de alta nebulosidade nos meses mais chuvosos.

Vale ressaltar também que devido aos baixos índices pluviométricos, a costa cearense possui um reduzido aporte fluvial que desempenha um baixo volume e transporte de material siltito argiloso para a Plataforma continental. (Maia, 1998).

Freire (1985), Barreto e Summerhayes (1975) descrevem durante a operação GEOMAR VVIII que a salinidade nessas águas varia entre 36 e 38%. Nos meses chuvosos, quando há um aumento da descarga das bacias hidrográficas do continente, essa faixa tende a baixar levemente, chegando entorno de 36%.

1.1.2 Correntes

A costa cearense é banhada por águas de alta salinidade e oxigenação da Corrente norte brasileira, tal qual representa um ramo da Corrente Atlântica Equatorial que atinge de frente a costa brasileira entre as cidades de Recife e Natal, com direção NW.

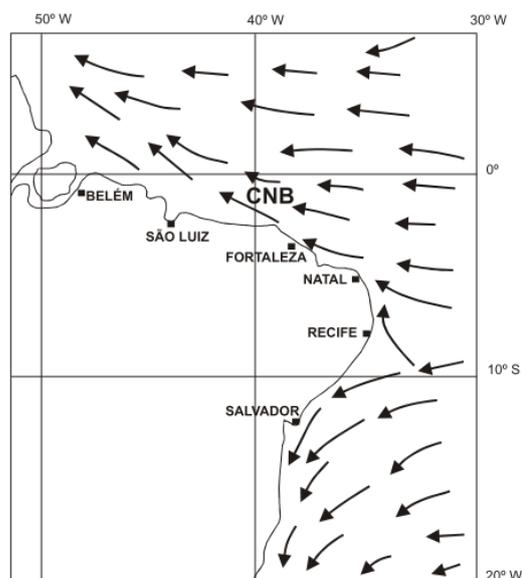


Figura 2- Mapa de distribuição de correntes permanentes na região Nordeste do Brasil. CNB: Corrente Norte Brasileira (Freire & Cavalcanti, 1998).

De acordo com Freire (1985), durante a operação GEOMAR XVIII foram monitoradas quatro estações de correntometria na plataforma interna e externa junto das fozes do Rio Jaguaripe e Rio Coreaú que registraram respectivamente os valores de 0,23 m/s, direção NW e 0,24m/s de direção W.

1.3 Plataforma Continental

A plataforma continental caracteriza-se por uma zona em margens continentais que apresenta suaves gradientes de declínio que abrangem desde a linha de costa até a zona de quebra da plataforma, marcada por uma mudança abrupta do gradiente da profundidade (Suguio, 2003; Batista Neto e Silva, 2004). Sua morfologia se relaciona com um efeito acumulativo dos processos cíclicos de variação do nível do mar, que para este tipo de zona caracteriza-se com intenso retrabalhamento do fundo marinho (Suguio, 2003).

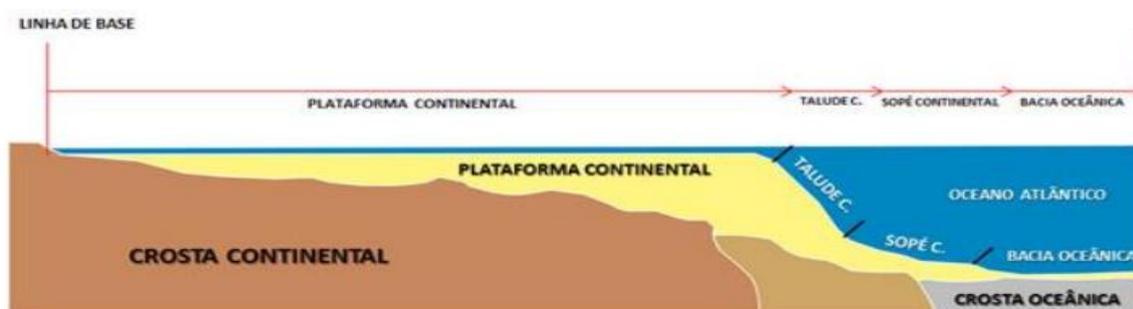


Figura 3-Esquema da classificação do assoalho marinho, mostrando seus principais aspectos morfológicos. Adaptado da Comissão Interministerial para Recursos do Mar- CIRM.

A plataforma continental brasileira talvez contenha a maior área contínua submersa dominada por sedimentação carbonática no mundo, estendendo-se do Norte tropical ao Sul temperado (Carannante et al., 1988). Em seu setor tropical, se caracterizou uma reduzida largura da plataforma, pouca profundidade, águas relativamente quentes, entre 25 e 30°C, e elevada salinidade, entre 30 e 38 ‰. Outra particularidade de importância é a ausência total de oóides e outras formas de precipitação inorgânica de carbonato (Coutinho, 1995).

1.4 Aspectos da Plataforma Continental do Ceará

A plataforma continental cearense possui uma largura média de aproximadamente 64 km, atingindo largura máxima de 101km a Oeste, na região do município de Camocim e mínima de 41 km na região do município de Icapuí. Dentro de toda essa região são encontrados paleocanais parcialmente preenchidos e desenvolvidos ao longo de períodos regressivos do nível do mar.

Nesta região é possível também definir dois grupos distintos de sedimentação baseados nos seguintes parâmetros condicionantes (Freire & Cavalcanti, 1998):

- Textura
- Teor de CaCO_3
- Associações bioclásticas
- Grau de retrabalhamento dos componentes Bióticos
- Composição mineralógica

Desta forma Freire & Cavalcanti (1998) identificaram duas marcantes províncias; Siciliclástica ($\text{CaCO}_3 < 50\%$) e carbonática (CaCO_3)

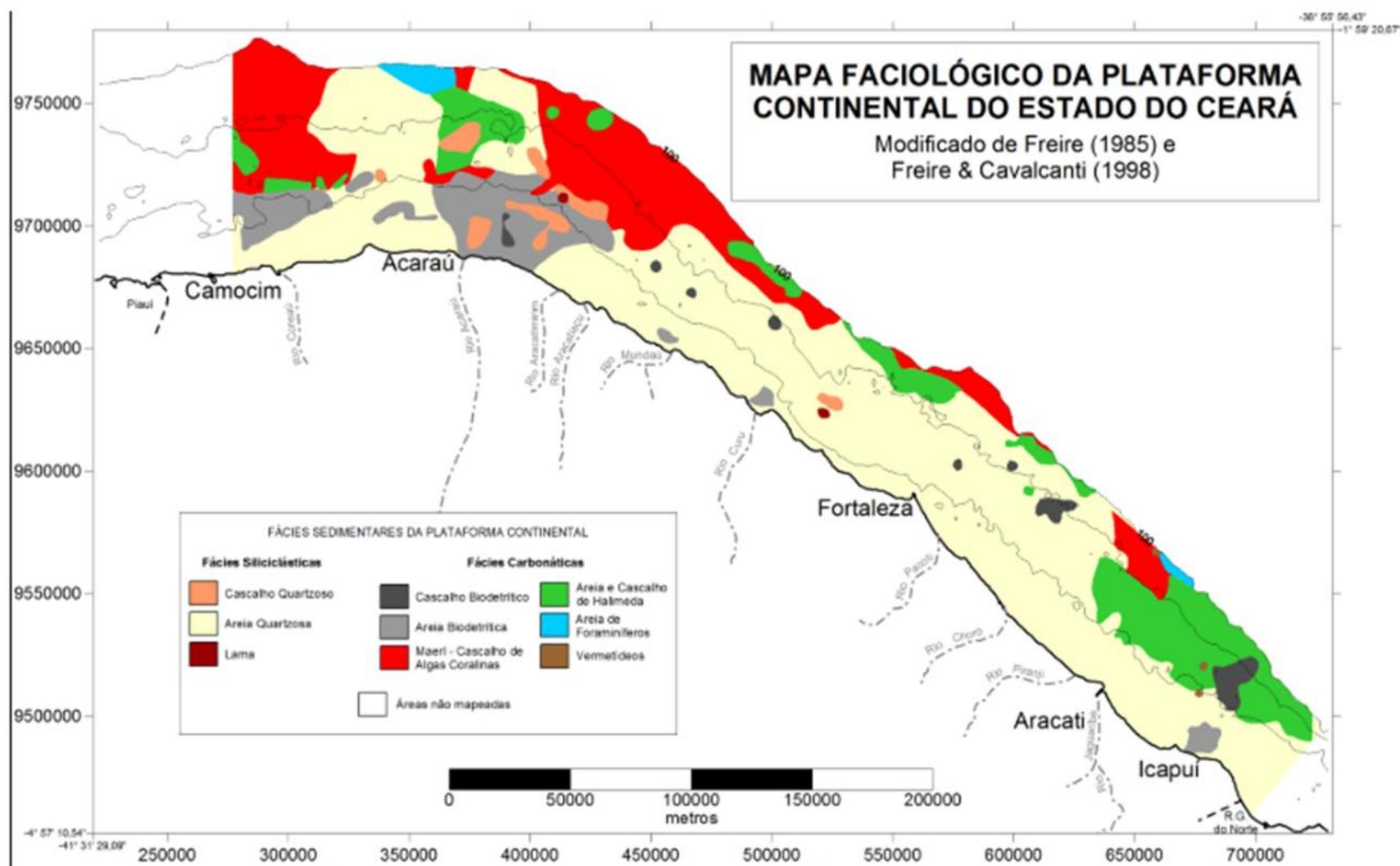


Figura 3-Mapa da distribuição de sedimentos na Plataforma Continental do Ceará. Modificado por Freire (1985) e Freire & Cavalcanti (1998).

1.4.1 Província Siliciclástica

A maior ocorrência de sedimentação siliciclástica ocorre acerca do Estado do Ceará, estritamente na plataforma interna, cujas profundidades não ultrapassam 20 metros. No segmento E-W, as fácies siliciclásticas também ocorrem, mas desta vez em forma de bolsão em frente a cidade de Acaraú (Silva Filho, 2004).

Pode-se definir que as principais fácies siliciclásticas na plataforma continental do Ceará são segundo Freire (1985) e Freire & Cavalcanti (1998):

- Cascalho Quartzoso: Com ocorrências em manchas, predominantemente próximo a cidade de Acaraú, zona caracterizada pela mudança de direção da plataforma que sai de um lineamento E-W para NW-SE. Nesta zona, os grãos são subangulares, recobertos por películas de óxido de ferro. Associa-se a areia grossa quartzosa.
- Areia Quartzosa: É a fácies predominante na província siliciclástica, especialmente na plataforma interna (profundidade < 20m) no segmento de direção NW-SE
- Lama: Com ocorrência em forma de manchas localizadas em frente a cidade de Acaraú e a Noroeste da cidade de Fortaleza.

As areias siliciclásticas nesta província vão apresentar duas importantes características. A primeira delas é o caráter palimpsesto, ou seja, com componentes bióticos retrabalhados. Sua composição é em maioria subarcoseana, apresentando-se ortoquartzosa ao se aproximar da linha de costa. Os grãos quartzosos também vão apresentar formas arredondadas, de superfície brilhante, muitas vezes também foscos e picotados. A segunda característica marcante é um grau de assimetria predominantemente negativa, podendo indicar deficiência de materiais finos. Silva Filho (2004) explica que esse fato pode ser devido a inexistência de drenagem continental relevante no litoral, e também um clima semi-árido que ocasiona a formação de cinturões litorâneos, barrando assim o aporte fluvial para o mar.

1.4.2 Província Carbonática

Nesta província, os depósitos se distribuem em uma faixa contínua que está praticamente limitada a plataforma externa (profundidade > 20m) no segmento da plataforma NW-SE. Na região próxima de Acaraú também há uma certa predominância (Silva Filho, 2004).

A concentração de CaCO_3 nos sedimentos carbonáticos é superior a 75%, atingindo altos teores a oeste da Cidade de Fortaleza com valores de 95% nas fácies de alga *maerl* (Freire & Cavalcanti, 1998).

Ainda, segundo Freire & Cavalcanti (1998), há retrabalhamento de componentes bioclásticos em alguns setores da plataforma continental, principalmente nos limites da província e defronte para a cidade de Acaraú. Os grãos apresentam cor acinzentada e um grau de perfurações, indicativo de bioerosões que se misturam com areais quartzosas.

São cinco as principais fácies de sedimentos carbonáticos que ocorrem na plataforma continental do Ceará (Freire, 1985; Freire & Cavalcanti 1998).

- *Maerl* (Cascalho de algas coralinas): Ocorre de forma prevaiente no segmento E-W da plataforma continental e estende-se para leste até a altura da foz do rio Curu. Ocorrências mais pontuais também são encontradas no segmento NW-SE. Nesta fácies predominam cascalhos de forma livre ramificada, por vezes na forma de rodólitos.
- Areia e cascalho de *Halimeda*: Possui predominância essencialmente na extremidade sudeste da área de estudo, com algumas zonas pontuais que se distribuem dentro do domínio das algas coralinas. A textura dos depósitos varia de areia a cascalho, intercalados por segmentos, ora de *Halimeda incrassata*, ora de *Halimeda tuna*. Há também ocorrência de foraminíferos planctônicos, moluscos e algas coralinas de maneira subordinada.

- Areia de foraminíferos: São encontrados isoladamente na borda externa da plataforma continental defronte as cidades de Acaraú e Aracati. Predominam testas de globigerina e pterópodos.
- Vermetídeos: Ocorrendo em áreas reduzidas, é encontrada na extremidade sudeste do segmento NW-SE da plataforma, na região de desembocadura do rio Jaguaripe.
- Areia e cascalho biodetríticos: Ao contrário das outras fácies, esta ocorre de maneira anômala na plataforma interna, principalmente nas zonas acerca de Acaraú e Icapuí. É formada por uma mistura de fragmentos de moluscos, briozoários, foraminíferos, algas coralinas e/ou *Halimeda*, em que não há predomínio de algas calcárias. Por estar nessa zona, apresenta um grau relativamente elevado de retrabalhamento.

1.4.3 Ambiente Bentônico

Dentro de divisão da plataforma continental proposta por Carannante (1988) e posteriormente Coutinho (1995) (Figura 5), tem-se em sua porção mais tropical uma série de fatores que contribuem para a configuração de formas de vida bentônica que vemos atualmente. Baixas espessuras de coluna d'água, em sua maioria não ultrapassam valores de 60m, o clima semiárido da região que suprime qualquer formação de redes de drenagem e conseqüentemente o transporte e deposição de sedimentos terrígenos para a zona da plataforma. O terceiro e último demarca a ausência de corais hermatípicos, deixando livre de competição as algas calcárias bentônicas. Milliman (1977) e Caranante (1988) explicam que esse fenômeno se deve a barreira de baixa salinidade, alta carga de sedimentos em suspensão das desembocaduras do Rio Orinoco e Amazonas e também presenças da forte corrente norte brasileira que impede o avanço a migração de corais a partir do mar do Caribe.

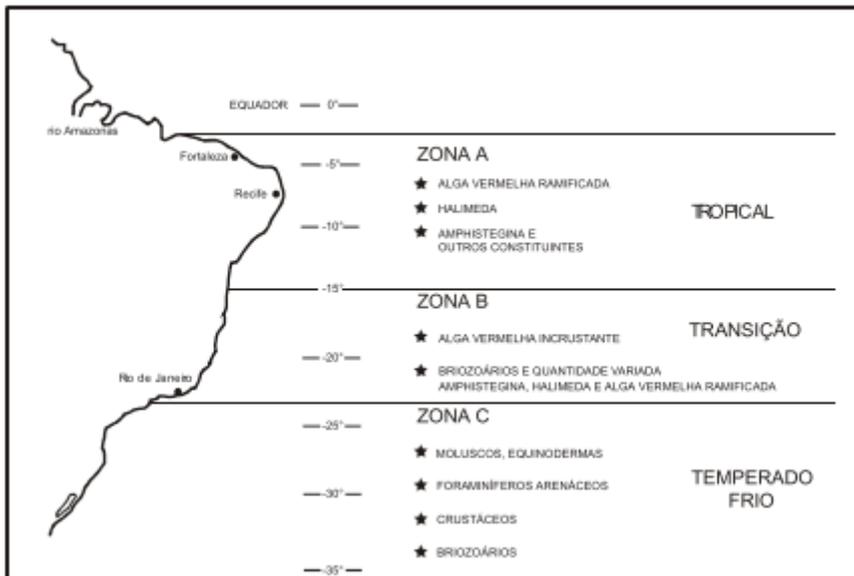


Figura 4- Figura 5-Mapa da distribuição de espécies de Algas na plataforma continental brasileira (Caranante,1988).

1.5 Evolução Tectônica

1.5.1 Abertura do Atlântico Sul

A Província Borborema e a porção oriental da margem equatorial englobam uma série de bacias inicialmente intracontinentais, denominadas de riftes, associadas com a intersecção entre os ramos Equatorial e Sul do Sistema Rifte Atlântico, demonstrando que a massa continental foi submetida a um estiramento difuso durante o Eocretáceo, com deformação distribuída numa região com mais de 600 km de largura e fortemente influenciada pela complexa herança pré-cambriana (Matos, 1992, 1999).

A deformação associada à abertura do Atlântico Sul, iniciou-se durante um intervalo Triássico-Jurrássico. Enquanto o primeiro, caracterizado por atividade magmática e sedimentação no sul e norte do Brasil (Matos, 1999).

Unterneh et al (1988), afirma que através da cronologia entre sequências estratigráficas entre o Brasil e África, é possível indicar que a deformação do Evento Atlântico Sul gerou riftes interiores que posteriormente se demarcam como diversas bacias tipo rifte na região Nordeste.

A orientação consistente de bacias rifte segundo o eixo NE-SW, subparalela ao eixo do Atlântico Sul (N-S a NE-SW), sugere que durante o

Neojurássico toda a região da Província Borborema foi submetida a uma extensão NW-SE, como resultado da propagação para norte do Ramo Sul do Atlântico (Matos, 1999). Matos (2000), propôs um modelo de evolução tectônica do Atlântico Equatorial em 3 estágios com base, nas particularidades do estilo estrutural associação de fácies, taxa de deformação etc. Os estágios são, prétransformante, sintransformantes pós transformantes.

1.5.3 Estágio Sinrifte e pré transformante

Durante a fase rifte principal, ocorre uma deformação continental generalizada, promovendo a geração de 3 segmentos de riftes. Gabão – Sergipe- Alagoas, Reconcavo-Tucano- Jatobá e Cariri Potiguar. Estes consistem em uma série de hemi-grábens assimétricos de *trend* NE-SW, separados por altos dos embasamentos, falhas de transferência e zonas de acomodação. O azimute das discontinuidades pré-cambrianas controlou a localização e nucleação das falhas normais delimitantes das bacias, bem como as mudanças longitudinais na polaridade dos riftes (Matos, 1992). Um ótimo trend de transporte tectônico seguindo NNW-SSE está relacionado com o desenvolvimento desses grábens na Província Borborema. Neste período, a meg azona de cisalhamento Pernambuco-Ngaundere, funcionou com uma enorme zona de acomodação, balanceando a deformação extensional norte e sul.

1.5.4 Estágio Sin Transformante

Na medida em que o estiramento aumentou e a zona transtrativa equatorial alargou-se, a litosfera tornou-se progressivamente mais fina, em algumas curvas de alívio, aonde ocorreu a formação de “intumescências fraturadas” (fracturedwells) em janelas de crosta oceânica na crosta continental, renunciando o aparecimento de cristas meso-oceânicas. Isto levou à formação de falhas transformantes conectando os centros de proto- espalhamento na região, definindo um limite litosférico entre África e América do Sul e forçando a deformação a migrar para maiores profundidades (Matos, 2000).

É importante notar que a direção de transporte tectônico ao longo da margem inteira foi cinematicamente controlada pelo movimento divergente oblíquo da África e Brasil, como sugerido pelas direções de espalhamento inferidas de reconstruções do Albiano no Atlântico Central e Sul (Pindell et al.,

1988; Scotese et al., 1988; Unternehr et al., 1988). O limite litosférico foi definido por um conjunto de falhas transformantes que forneceram um arcabouço de *rightoversteps*, mecanicamente responsável pela acomodação dessa rotação deformacional. Algumas bacias localizadas no coração de segmentos transtrativos maiores podem apresentar um estilo tectônico local próximo de uma bacia extensional pura, como hemi-grábens basculhados e falhas normais. Entretanto, a margem como um todo foi claramente marcada pela obliquidade geral do movimento entre África e Brasil (Matos, 2000).

Com o processo de fragmentação marcadamente dominado por cisalhamento e controlado cinematicamente ocasionou em discordâncias diacrônicas de pseudo separação. Em segmentos divergentes do Atlântico Sul, aonde havia a separação com a mudança da subsidência mecânica (estágio rifte) para uma termicamente controlada (estágio de margem passiva).

Nas bacias sedimentares ao longo da margem equatorial brasileira, proximidade de uma falha transformante define quando e onde uma margem transformante torna-se uma margem passiva. Como a plataforma continental de algumas bacias desenvolveu-se bem distante de qualquer falha transformante, essas bacias apresentam arquiteturas e distribuições faciológicas típicas de margens passivas (Matos, 2000).

1.5.5 Estágio Pós Transformante

No Cenomaniano foi finalmente alcançado o ambiente de margem continental passiva típica. Concomitantemente, a influência tectônica das zonas de fratura/falha transformante tornou-se um controle menor no espaço disponível gerado pelo resfriamento da litosfera e variações no nível do mar. As curvas de subsidência de segmentos de margens transformantes indicam, durante esse estágio, uma redução do componente tectônico da subsidência total (Matos, 2000).

2 Revisão teórica

2.1 O Método sísmico de reflexão

Os Métodos sísmicos representam formas de investigação que utilizam da propagação de ondas acústicas para se compreender a subsuperfície. Dentro do mundo da prospecção geofísica, esse mesmo método descreve um papel fundamental em qualquer tipo de estudo indireto de zonas imersas, seja para a prospecção de hidrocarbonetos ou para estudos de caracterização rasas do fundo marinho. Utilizando esse método é possível obter informações essenciais para o entendimento de algumas características dos sedimentos, tais como espessura, geometrias internas, falhas, fraturas, acumulação de gases etc (Ayres,2000).

A sísmica de reflexão consiste no uso de uma fonte sísmica (Figura 6), que gera ondas acústicas que ao se propagarem em subsuperfície, percorrem diversas camadas geológicas, de diferentes litologias. Ao chegar nos limites dessas diferentes litologias, ocorre uma partição de energia e a onda é parcialmente refletida. Essa parte refletida da onda é então captada por um receptor que vai realizando essas leituras conforme a embarcação navega (Kearey et al, 2009).(Figura 6)

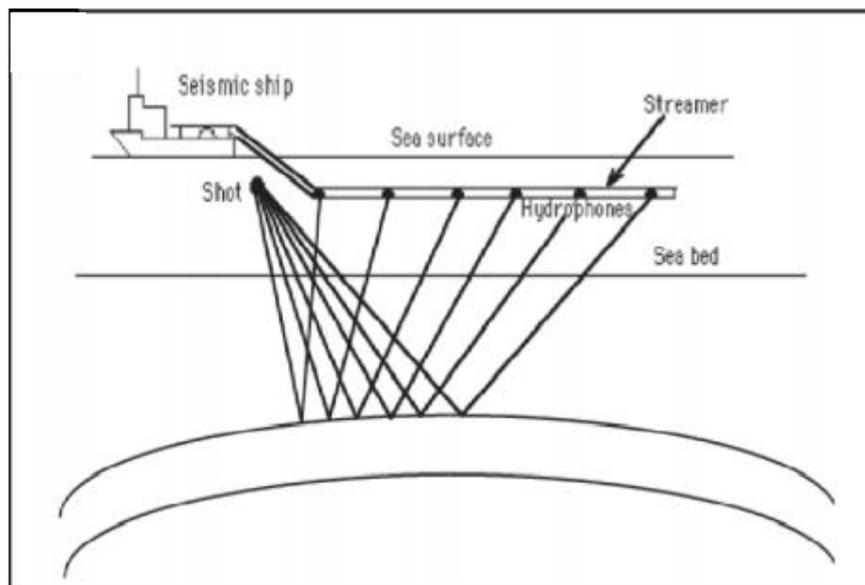


Figura 5-Esquema básico de aquisição de dados sísmicos de reflexão. Modificado de Evans, 1997 apud Kearey, 2009

As diferentes interações que uma onda sísmica pode sofrer ao ser refletida ou refratada por um meio são frutos das propriedades de tensão e deformação do material que interage com elas. A tensão (stress) é a medida de

intensidade de forças internas em equilíbrio de um material (Kearey et al, 2009), enquanto a deformação marca as mudanças na forma e estrutura do material ao sofrer a aplicação destas forças (Telford et al, 1990). As propriedades de tensão e deformação são diretamente influenciadas pelas propriedades dos sedimentos, tais como, granulometria, porosidade, grau de compactação, permeabilidade etc. (DIAS,2004; Jackson 2007). A resposta sísmica entre essa interação e combinação de características irá variar sempre e, ser diferente para cada tipo de sedimento.

Um parâmetro também muito importante a ser tratado é a impedância acústica, produto da velocidade de uma onda sísmica em um meio por sua respectiva densidade. Em termos de interpretação sísmica, a mesma descreve produto de contrastes de diferentes litologias que se diferem por diversos parâmetros, tais quais como, mineralogia, porosidade, conteúdo de água nos poros (Ayres,2000).

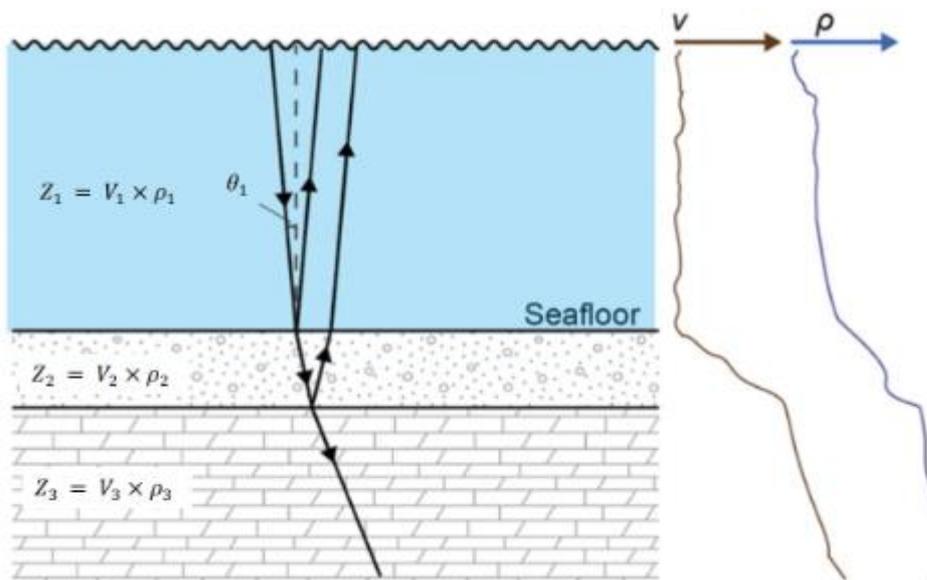


Figura 6- Esquema de interação e propagação da onda sísmica em sedimentos e rochas. Retirado de Jakobsson et al, 2016)

2.1 Atributos sísmicos

Desde a sua introdução no começo dos anos 70, os atributos ganharam uma popularidade considerável como ferramenta analítica de predição de litologias e caracterização de reservatórios (Taner,2005). De forma objetiva

podem ser definidos como quaisquer quantidades, medidas ou computadas a partir dos dados sísmicos como medidas de tempo, amplitude, frequência e/ou atenuação (Markfurt, 2018).

Barnes (2016) classifica os atributos de acordo com a sua função e significado, tendo em vista parâmetros matemáticos, geofísicos e geológicos (Figura 8).

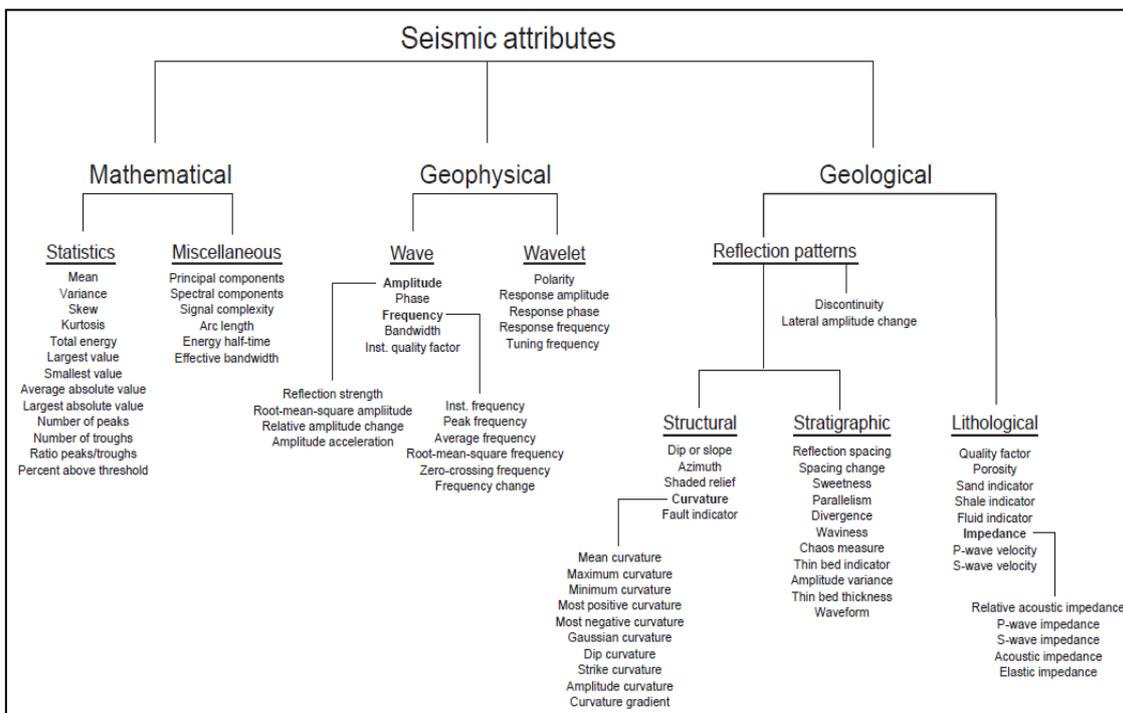


Figura 7-Classificação de atributos sísmicos pelas suas propriedades (Chen e Sidney, 1997; Brown, 2011, p. 284. Retirado de Barnes, 2016).

Comumente, os atributos sísmicos são expressos como mapas, *cross-sections* e volumes, sendo mapas a opção mais utilizada, pois advém dos horizontes sísmicos, produtos chaves da interpretação sísmica.

Nos próximos tópicos serão abordados os diferentes atributos utilizados para a confecção deste trabalho.

2.1.1 Impedância Acústica Relativa (IAR).

A impedância acústica (Z), anteriormente definida como sendo o produto da densidade de um material pela velocidade da onda P no seu meio. Agora introduzindo um novo termo que é o coeficiente de reflexão (R):

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

Sendo Z_2 a impedância acústica de uma camada n , enquanto Z_1 representa a impedância acústica de uma camada $n-1$.

Se as impedâncias acústicas em uma região variam suavemente, o coeficiente de reflexão pode ser aproximado como a derivada vertical da impedância no tempo.

$$R \approx \frac{\Delta Z_j}{2Z_j} \approx \frac{1}{2} \Delta(\ln(Z_j))$$

Z_j indica a impedância média sobre uma camada j .

Integrando agora de $j=0$ para $j=n$ tem-se:

$$Z_n = Z_0 \exp 2 \sum_{j=0}^n R_j \Delta t$$

Realizando agora uma análise no domínio das frequências, Lancaster e Whitcombe (2000) observaram que o espectro de refletividade é o produto da frequência radial (ω) na unidade imaginária i pelo espectro de impedâncias. Desta forma, podemos dizer também que o espectro de impedância seria o espectro de refletividade dividido por ωi . Agora, rotacionando o dado por $i = \exp(i\pi/2)$ ou 90 graus, tem-se um aumento da contribuição das baixas frequências em função da diminuição das altas. Essa rotação resulta em resultados positivos e negativos de refletividade que podem ser associados com contrastes de impedância, convertidos para valores de impedância acústica. Como em um dado sísmico de reflexão faltam nos traços informações de

frequências na faixa dos 0-8 Hz, o atributo é chamado de Impedância acústica relativa, em comparação com os resultados da impedância acústica absoluta (Markfurt,2018)

2.1.2 Frequência Instantânea

A frequência instantânea pode ser estabelecida como a derivada no tempo da fase instantânea. Sendo definida como:

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \theta_i(t)$$

Como a fase instantânea $\theta_i(t)$ muitas vezes não é contínua em todo seu domínio, então também não será diferenciável. Uma maneira de mitigar essa questão é descrevendo $\theta_i(t)$ como uma relação de duas funções periódicas $y(t)/x(t)$, contínuos e diferenciáveis em seus domínios. Desta forma a expressão inicial se torna:

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \arctang \left[\frac{y(t)}{x(t)} \right]$$

Pela regra do quociente podemos expandi-la para:

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{x(t)y'(t) - x'y(t)}{x^2(t) + y^2(t)}$$

Este atributo pode ser muito útil como possível indicador de hidrocarbonetos, indicador de espessura da camada, zonas de fratura, mas pode promover uma certa ambiguidade ao passo que é sensível a mudanças tanto na propagação da onda, quanto nas características deposicionais. Soma-se também o fato de que o a fase instantânea possui muitas variações abruptas, recomendando-se o uso de outros atributos derivados como dado de entrada, como a *Phase Response*, ou a frequência média instantânea.

2.1.3 Fase Instantânea

A fase instantânea é a medição angular da posição relativa da senóide que melhor representa o traço sísmico em um intervalo pequeno no tempo. Apresenta valores de 0° no pico, 180° nos vales, -90° quando a primeira derivada do traço sísmico é maior que 0 e 90° a primeira derivada do traço sísmico é menor que 0.

Sendo uma função descontínua que varia de -180° a $+180^{\circ}$ (Figura 9), comumente utiliza-se o cosseno da fase, que opera como um ganho automático, removendo toda a informação de amplitude.

O atributo de fase pode ser efetivamente utilizado em diversas situações, mais usualmente como grande indicador de continuidade lateral e também é possível correlacionar a componente da fase com a forma de propagação da onda sísmica (Taner, 1992).

2.1.4 Sweetness

Criado exclusivamente para destacar unidades litológicas com acumulações altas de hidrocarbonetos, caracteriza-se por ser um atributo stratigráfico que geralmente é utilizado para individualizar pacotes areníticos. Pensando em um exemplo de acumulação de gás em um arenito, tem-se que a resposta sísmica desse tipo de litologia será de altos valores de amplitude e baixos valores de frequência. Esses tipos de acumulação, comumente chamadas de “*Sweetspots*”, nomeiam esse atributo. Sua fórmula é:

$$Sweetness = \frac{Envelope}{\sqrt{Frequência\ instantânea}}$$

$$\text{Sendo, } Envelope = \sqrt{R(t)^2 + Img(t)^2}$$

O atributo de Envelope, representa a raiz quadrada dos quadrados da componente real do traço sísmico ($R(t)$) e a sua respectiva parte imaginária ($Img(t)$).

3 Metodologia

A metodologia aplicada visou classificar o tipo de fundo (teor de carbonato, areia, cascalho, etc) utilizando atributos sísmicos na região da plataforma do Ceará.

Todo o estudo pode ser dividido em etapas que foram desde o carregamento dos dados e criação do projeto até a correlação dos atributos gerados com dados de amostras de fundo. Pode-se dividir também dois segmentos de análise, uma mais focada na análise estatísticas dos sedimentos e a segunda focada na construção e geração dos mapas com os atributos sísmicos.

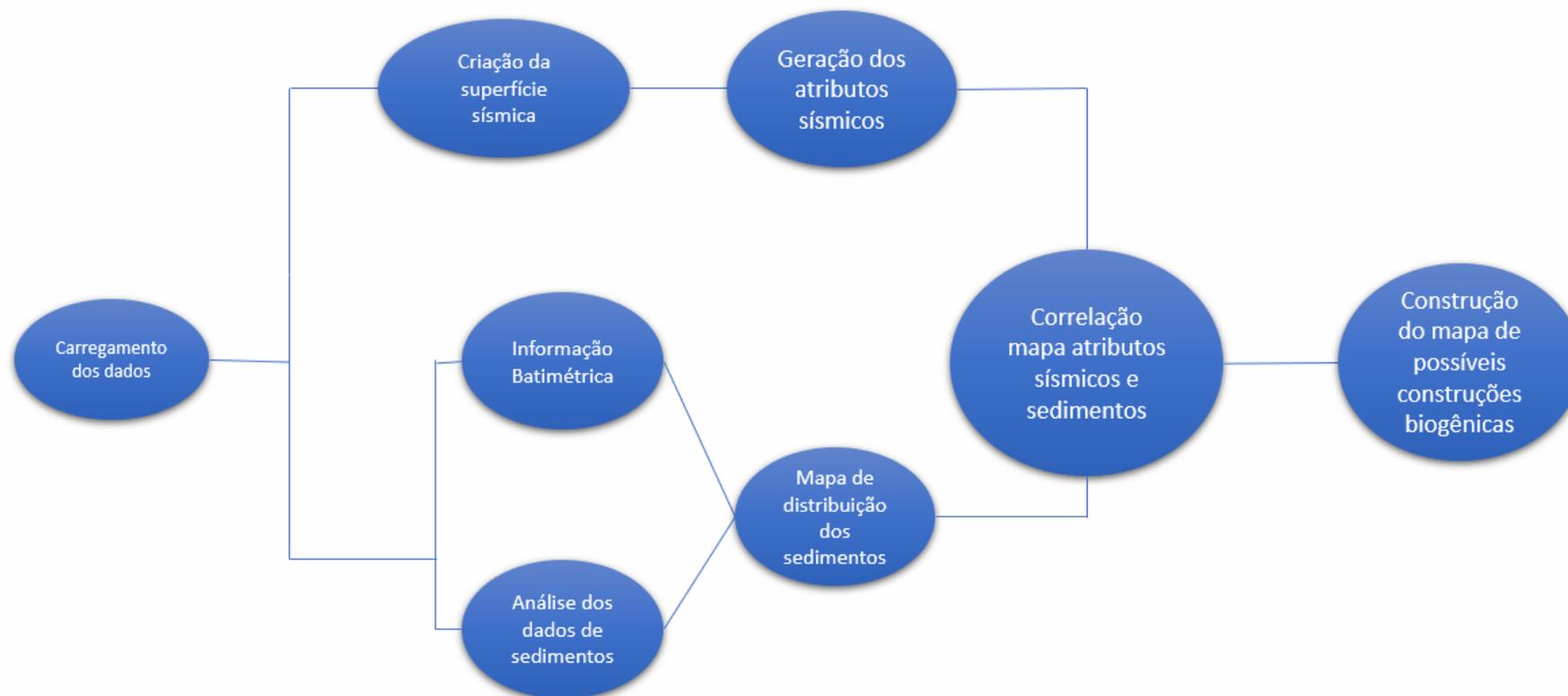


Figura 8- Fluxo de trabalho realizado.

3.1 Carregamento dos dados e criação do projeto

3.1.1 Dados sísmicos

Os dados sísmicos disponibilizados representavam ao total 387 linhas sísmicas 2D. Deste total de linhas, 247 foram doadas da ANP e 140 foram da empresa *Spectrum*.

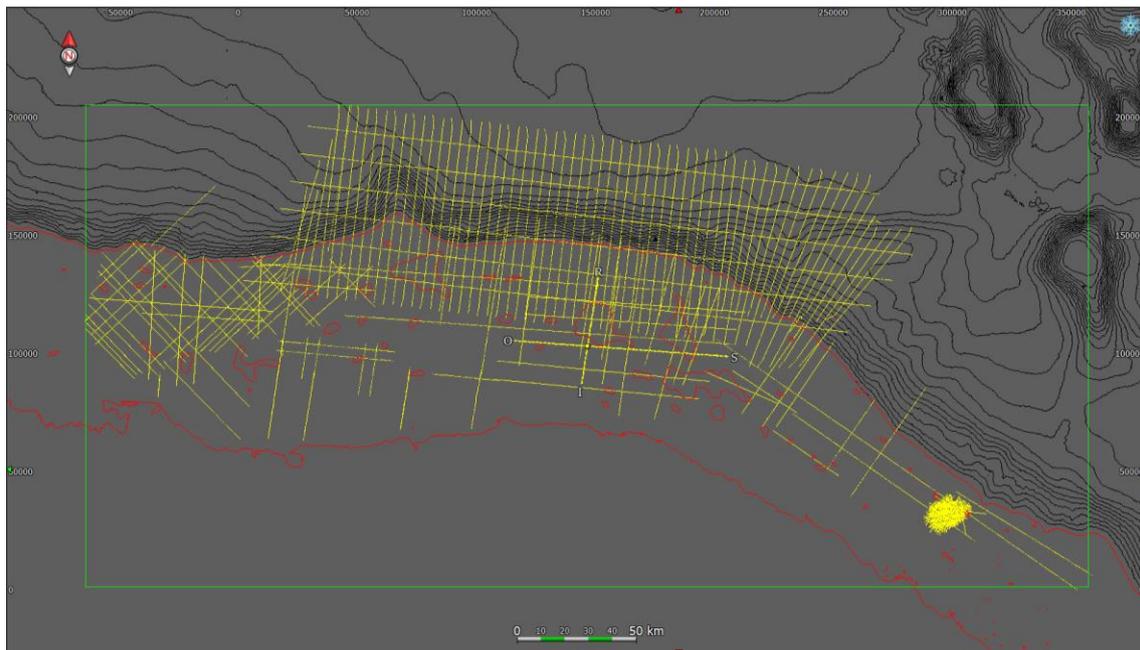


Figura 9-Mapa da área de estudo contendo todas as linhas sísmicas 2D

3.2 Amostras de fundo

Foram utilizados ao total 257 amostras de sedimento de fundo coletadas por *Boxcore* em campanhas pretéritas da marinha e pertencentes ao BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos). Neste tipo de dado, além da descrição do tipo de sedimento presente também se tinham dados de teores de carbonato, areia, silte, cascalho e argila de todas as amostras tendo-se como base os mecanismos de classificação de Shepard e Larssoneur (Figura 11)

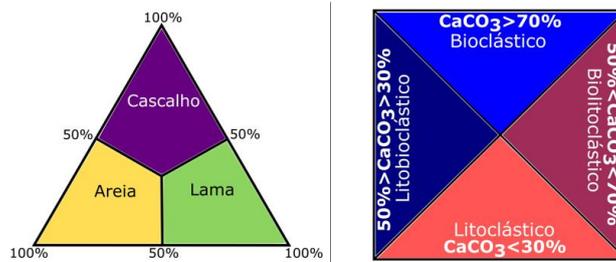


Figura 10-Modelo de Shepard simplificado a esquerda e modelo de Lassoneur utilizado a direita

O método proposto por Shepard (1954) baseia-se na classificação textural do tipo de sedimento com base em seu conteúdo de areia, argila e silte. Para este estudo, como esperavam-se poucos grupos de sedimentos dominantes regionalmente e para facilitar o posterior processo de clusterização dos tipos de amostras, optou-se por uma simplificação do modelo vigente de Shepard. No modelo simplificado desenvolvido (Figura 11), tem-se a separação dos sedimentos entre carbonato, areia e lama.

Na classificação de Larssoneur (1977), a diferenciação entre os tipos de sedimento se dá por percentuais de carbonato e pela granulometria da amostra, sendo o material Bioclástico com o maior teor de carbonato (>70%), enquanto o menor, Litobioclástico com as menores concentrações (<30%)

Com base nos sistemas de classificação apresentados, criou-se um mapa da distribuição de sedimento com os dois tipos de modelos. O objetivo deste mapa seria auxiliar a interpretação das anomalias vistas nos atributos sísmicos, servindo de controle para definir qualitativamente as possíveis distribuições de sedimento apresentados na análise sísmica. Inicialmente já percebe-se que possíveis zonas de interesse para construções biogênicas estariam associadas a concomitância entre cascalho (bolsões roxos) e material bioclástico (quadriculado azul).

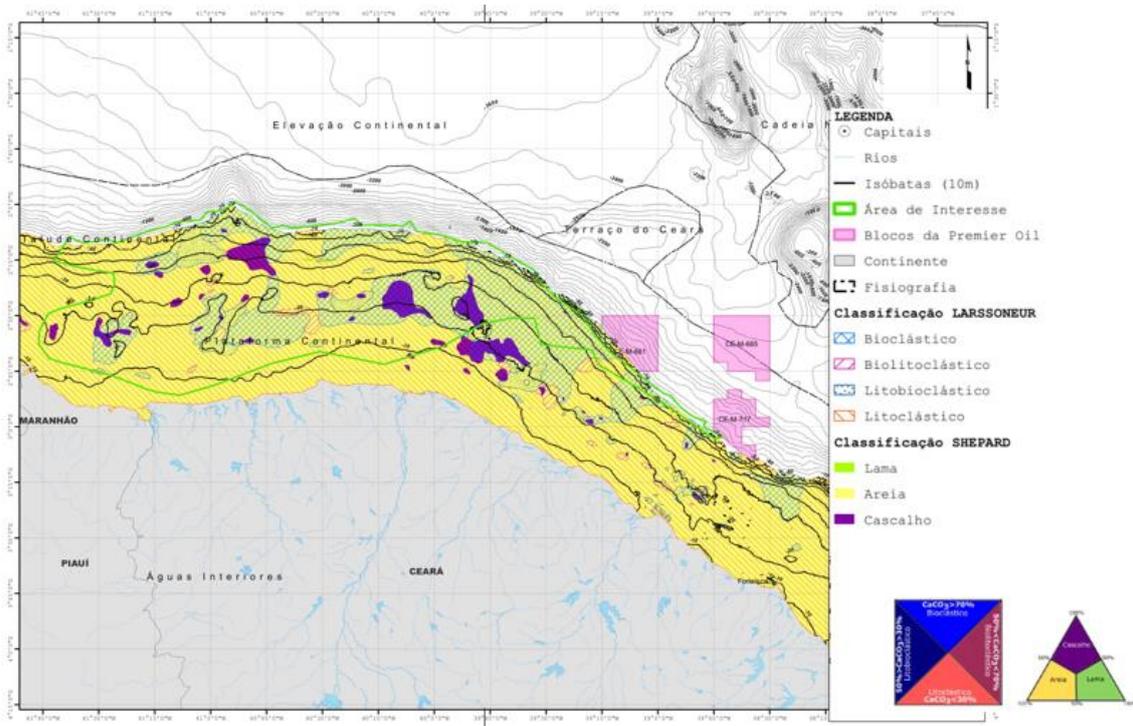


Figura 12-Mapa de distribuição de sedimentos gerado na zona de estudo a partir dos modelos de classificação de Shepard e Lassoneur

3.3 Dados Batimétricos

Também advindos do Banco Nacional de Dados Oceanográficos da Marinha, foi disponibilizado um mapa batimétrico de alta resolução, com curvas batimétricas de 1 m de espaçamento, possibilitando-se um alto detalhamento de estruturas na plataforma. Foram observados altos topográficos, paleo-canions.

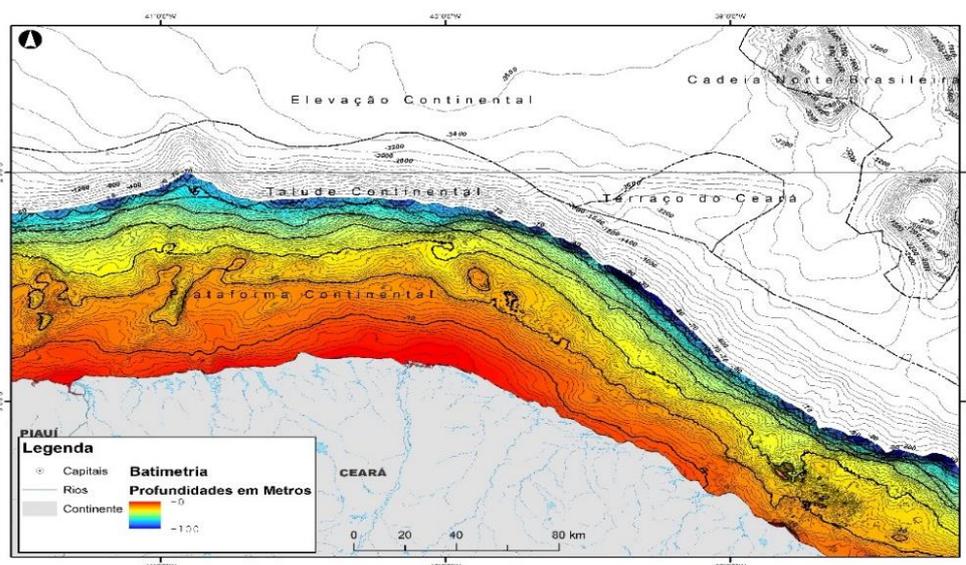


Figura 13-Mapa batimétrico gerado na zona de estudo

3.4 Dados sísmicos *Near Trace*

Dados *Near Trace* representam a primeira amostra (*zero-offset*) de um conjunto de traços sísmicos de um mesmo *shotpoint*. Comumente, traços sísmicos *fullstack* representam uma porção de dados onde são somados traços sísmicos de um mesmo ponto de tiro, mas de diferentes *offsets*. Desta forma, um traço sísmico formado se torna um somatório de vários outros traços adquiridos no mesmo ponto. Para este estudo, utilizou-se apenas o primeiro traço (Figura 15).

A criação das linhas sísmicas utilizando o dado *zero offset* tem sua relevância em comparação com os dados *fullstack*., já que os mesmos não passaram por nenhum processo de ganho e/ou filtros da etapa de empilhamento sísmico, sendo assim bastante sensíveis a possíveis ruídos ou feições da morfologia do fundo marinho. Vale ressaltar também que, como o ambiente de interpretação sísmico era composto por diversas linhas 2D adquiridas em diferentes campanhas, a comparação entre linha 2D *fullstack* e linhas 2D *Neartrace* foi de extrema importância para identificar possíveis diferenças de ganhos aplicadas nas linhas originais

3.5 Interpretação do fundo do mar (*Fullstack+NearTrace*)

Utilizando o software interpretação sísmica *Paleoscan*TM, o refletor sísmico relativo ao fundo do mar tanto nas sessões *full stack*, quanto nas *near trace* foi interpretado e com isso, gerados os grids 2D que posteriormente seriam interpolados

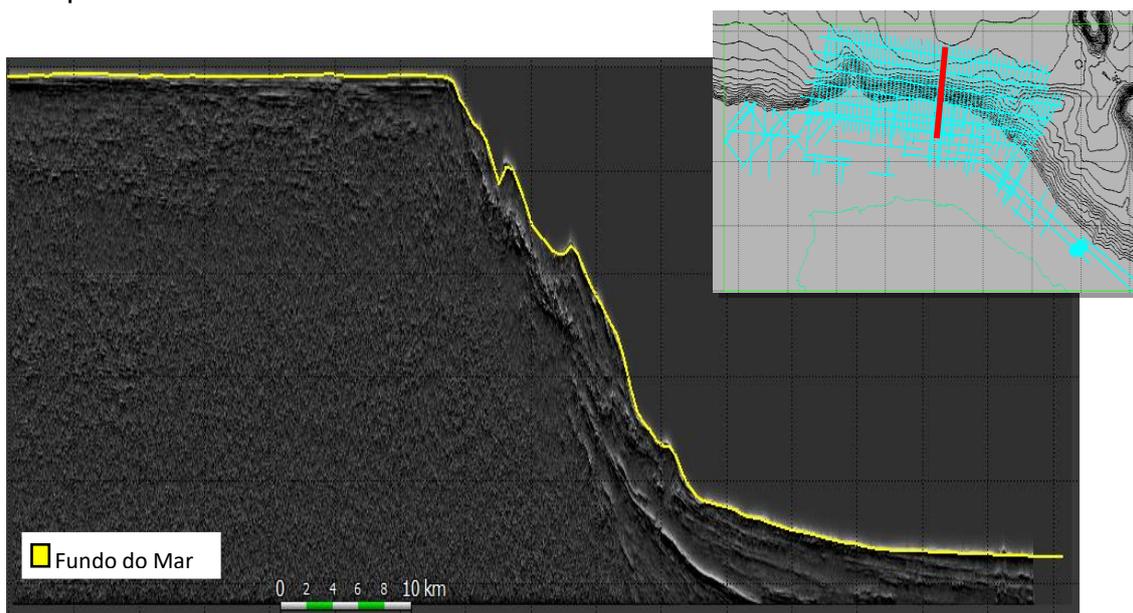


Figura 14- Linha sísmica com o fundo do mar interpretado da região de estudo

Para a interpolação foi utilizado o método de difusão, por ter apresentado os resultados mais próximos ao real na região e também ser um método com bons resultados para grandes quantidades de dados.

A interpolação por meio da difusão se baseia em um método parabólico que possui a seguinte fórmula:

$$\frac{\partial\theta(x,y,t)}{\partial t} = \alpha\nabla^2\theta(x,y,t) - \gamma\left(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y}\right)$$

Onde:

θ é o valor em Z (ms)

α é uma constante de difusão

γ é a tensão de superfície

R_x e R_y são os raios de curvatura para cada eixo

O raio de curvatura é definido como o raio de um círculo formado por no mínimo 3 pontos específicos. A fórmula para o raio da curvatura Rr em qualquer ponto para uma curva $\theta = f(r)$ é dada por:

$$Rr = \frac{\left[1 + \left(\frac{d\theta}{dr}\right)\right]^{3/2}}{\left|\frac{d^2\theta}{d^2r}\right|}$$

3.6 Geração dos atributos com as superfícies criadas

Para se obter uma ótima gama de atributos sísmicos que destacassem diversas propriedades inerentes ao sinal sísmico foram escolhidos 4 atributos + a amplitude. Os atributos escolhidos foram

1. *Sweetness*

2. *RelativeacousticImpedance*
3. *InstantaneousPhase*
4. *InstantaneousFrequency*

Após a geração de superfícies do fundo do mar com esses atributos no *PaleoscanTM*, a ideia inicial era confrontá-los entre si a fim de buscar algum tipo de correlação entre eles que suprimisse algum tipo de informação acerca do assoalho do fundo marinho também.

3.7 Correlação com os dados de amostras de fundo

A Correlação dos atributos com as informações de tipo de sedimento de fundo foi fundamental para a amarração quantitativa do processo, de modo que as anomalias que fossem observadas nos mapas gerados dos atributos sísmicos, tivessem um certo grau de analogia com os tipos de fundo encontrados na plataforma cearense.

Inicialmente foi feita uma varredura espacial das amostras de sedimento a partir de suas distâncias das linhas sísmicas, de modo a construir diferentes grupos amostrais. Foram feitas varreduras de 100m, 500m e 1000m de distância, sendo a menor a que continha menos pontos amostrados e a maior com um alto de amostras do fundo marinho.

Com os pontos escolhidos, foram extraídos dos traços sísmicos mais próximos, os respectivos valores de amplitude e atributos. Todo esse processo de extração foi realizado no software livre *Seisec*. Nele foi possível extrair dos arquivos SEG-Y, os traços sísmicos necessários.

O último processo foi realizar a dita correlação entre as amostras e atributos. Para isso, fora utilizado um software de ferramentas estatísticas chamado *ActionStat*, onde como produto obteve-se uma matriz de correlação.

Matrizes de correlação representam métodos básicos de estatística que permitem calcular a correspondência entre variáveis através de 3 tipos de coeficientes. Para este trabalho foi utilizado o coeficiente de Pearson que é o mais indicado para esse estudo, onde tem-se poucas variáveis.

O método de correlação de Pearson mede o grau de correlação entre duas variáveis de escala métrica intervalar e/ou de rácio/razão. Calcula-se o coeficiente a partir da seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X) \cdot var(Y)}}$$

Se $\rho=1$, a correlação entre as variáveis é perfeita e positiva.

Se $\rho=-1$, a correlação é perfeita, mas as variáveis são inversamente proporcionais.

Se $\rho=0$, as variáveis não dependem linearmente uma da outra, mas pode haver uma dependência não linear.

Como ferramenta de controle de qualidade foi feito o teste de p-valores de forma a mensurar o quão significantes seriam os resultados obtidos pelo teste de correlação de Pearson.

O p valor é calculado a partir da seguinte fórmula:

$$Z = \frac{\hat{p} - p_0}{\sqrt{\frac{p_0(1 - p_0)}{n}}}$$

Onde:

\hat{p} = Proporção de amostras

p_0 = Proporção de amostras para hipóteses nulas

n = Quantidade de amostras

Os valores de p-valor variam entre 0 e 1, sendo bons graus de correlação marcados por valores muito próximos de zero. Neste tipo de análise foram considerados graus de correlação para os dados que obtiveram um p-valor menor que 0,05.

4 Resultados

4.1 Análise Estatística dos Sedimentos

Como não haviam linhas 2D que interceptavam pontos com dados de sedimento, foram criados 3 grupos amostrais com base nas faixas de distância dos pontos de coleta de sedimento em relação a linhas sísmicas interpretadas.

Grupo amostral 0-100m: Os dados que preenchem essa faixa de distâncias foram bastante esparsos. Em contrapartida, neste grupo que se observou os maiores coeficientes de correlação entre sedimento e atributo sísmico.

Analisando os histogramas para esse grupo (Figura 15) nota-se que os dados de carbonato apresentam uma característica bimodal, com picos bastante discrepantes em função da relação de altos teores (próximos a 100%) e baixos (inferiores a 5%). Para os dados de areia e cascalho evidencia-se uma tendência simétrica entre a distribuição de ambos, demonstrando uma possível uma relação inversamente proporcional entre os mesmos.

Nos dados de curva de frequência acumulada (CFA), a baixa quantidade de amostras na análise afeta a forma das curvas geradas, mas é possível notar uma tendência para os dados de atributos sísmicos a uma distribuição normal.

Grupo amostral 0-500m: Neste conjunto amostral dada uma maior quantidade de amostras, tem-se uma mudança significativa em relação ao grupo 0-100m. Para esse caso, evidencia-se uma forte presença de um conteúdo alta frequência para ambos os tipos de dados, evidenciado por *spikes*. Mesmo com a introdução deste fator, a maioria das amostras mantém suas principais tendências de distribuição. Vale ressaltar que mesmo com essas variações ainda é possível identificar feições vistas no grupo 0-100m, como a simetria entre cascalho e areia e a característica bimodal do carbonato.

Para a CFA, como se tem uma maior quantidade de dados para fazer este tipo de análise, é possível notar com mais clareza a tendência dos dados de atributos sísmicos a terem uma distribuição em forma de “S”.

Grupo amostral 0-1000m: Os resultados foram muito semelhantes ao grupo de 0-500m. Vê-se mais uma vez uma presença de altas frequências em todos

os dados, com pequenas variações pontuais, mas em que ainda se é possível identificar as principais feições entre os dados do histograma.

A CFA também se mantém bastante semelhante com o grupo anterior, sendo ainda possível se ter as mesmas interpretações feitas anteriormente.

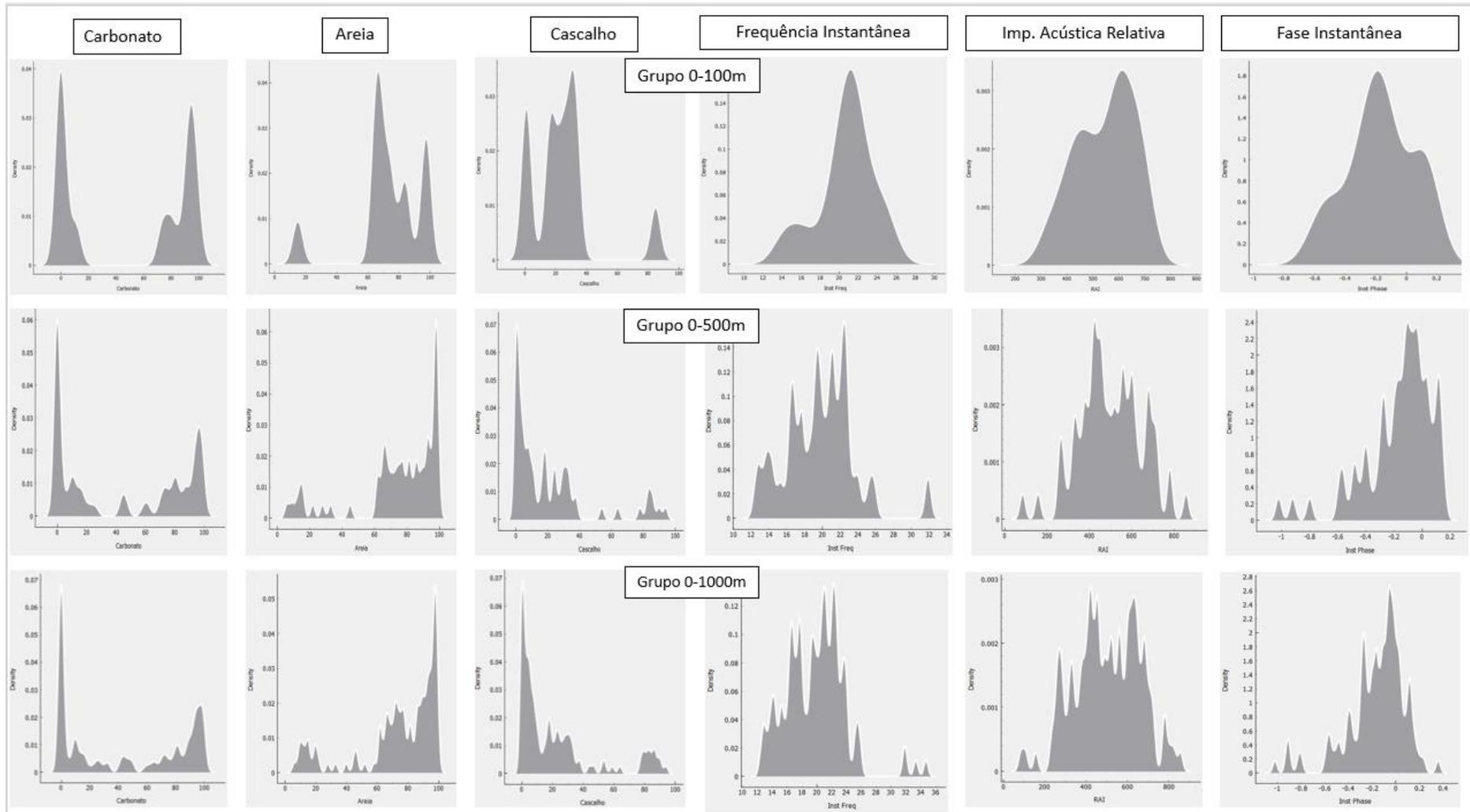


Figura 15-Histogramas os dados de sedimento e os dados de atributos sísmicos em diferentes conjuntos amostrais de busca

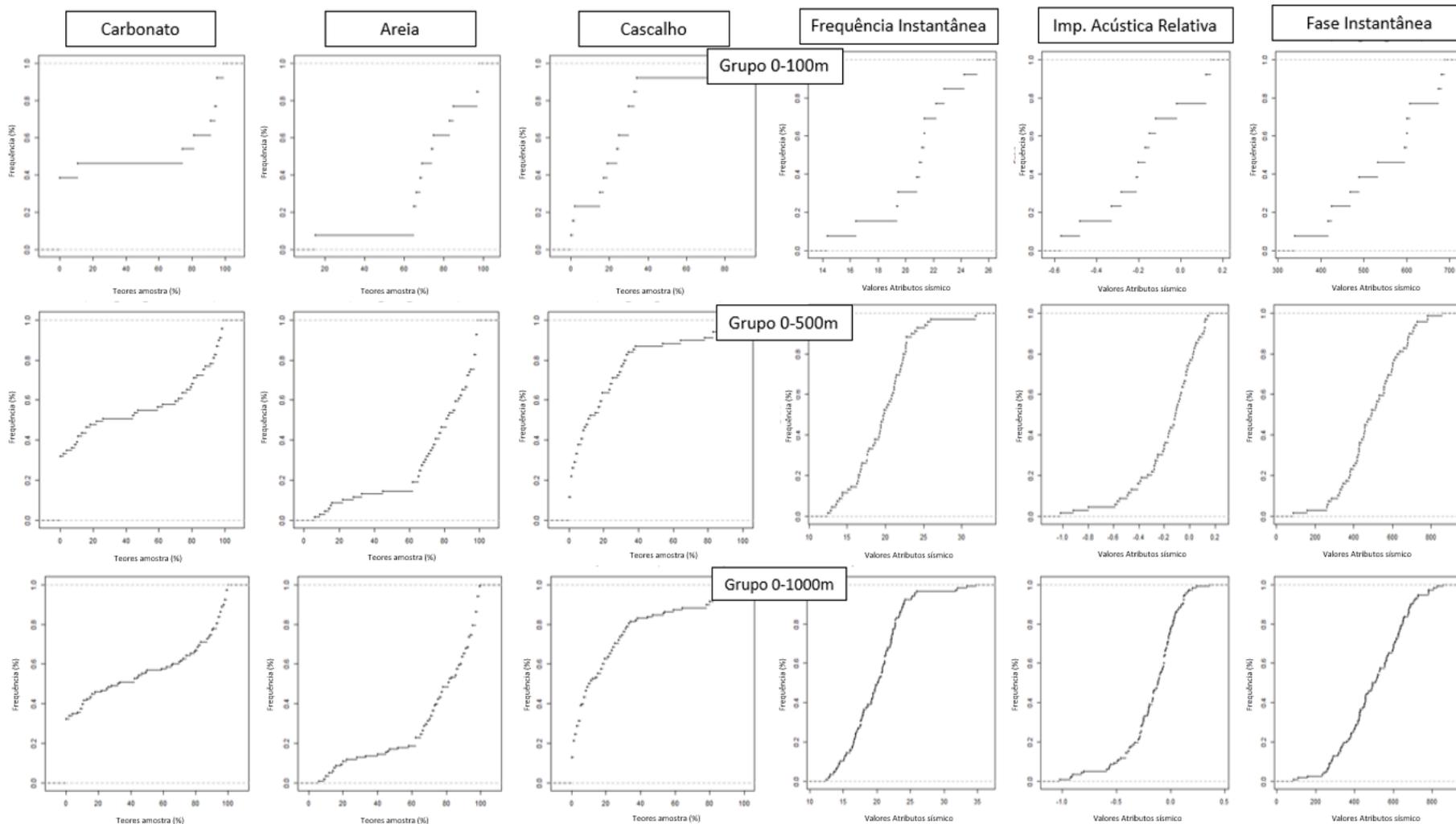


Figura 16- Curvas de frequência acumulada para os dados de sedimento e atributos sísmicos em diferentes conjuntos amostrais de busca.

4.2 Discrepâncias dados *Neartrace*

A proposta neste tipo de análise foi aferir possíveis discrepâncias entre o dado sísmico 2D Fulstack utilizado para interpretação sísmica e o mesmo dado com apenas os traços sísmicos *zero offset*. Grandes diferenças demonstrariam possíveis diferenças de ganho de amplitude aplicados as linhas sísmicas 2D.

Foi feita a seguinte relação de diferenças e posteriormente foi gerado um mapa de forma a visualizar espacialmente onde poderiam zonas de diferença de ganhos de amplitude entre as linhas sísmicas.

$$\text{Superfície de diferenças} = \text{Superfície FullStack} - \text{Superfície Zero Offset}$$

Com a superfície gerada é possível notar que em praticamente quase toda região, as diferenças entre os dois tipos de dados foram próximas de zero, evidenciando um grau de semelhança no valor de amplitude bem próximo entre elas. Próximo a linha de costa é possível notar as maiores diferenças, sendo elas sempre centralizadas em pontos de interseção entre linhas 2D. Este alto contraste pode ter duas principais explicações, sendo uma devida a pura diferença de ganho entre as linhas 2D que se interceptam e uma possível diferença entre os refletores interpretados para cada superfície.

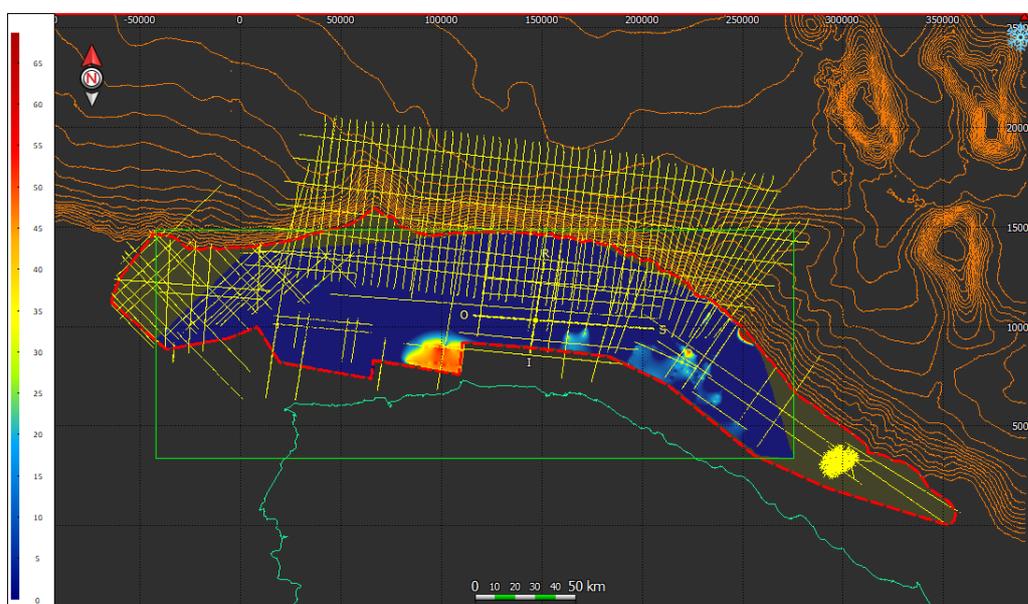


Figura 17- Mapa mostrando a diferença entre os dados Fulstack e dados Zero Offset, sendo cores quentes mostrando as maiores zonas de diferenças entre eles e cores mais escuras mostrando uma diferença bem próxima de zero.

4.3 Anomalias Atributos Sísmicos

Em todos os atributos sísmicos calculados foram observadas anomalias. Como uma forma de classificar os resultados e também de realizar um controle de qualidade com o mapa de distribuição de sedimentos e batimétrico, os atributos que obtiveram as melhores respostas foram de frequência instantânea e fase instantânea. Para isso, foi levado em consideração a disposição de anomalias que não estivessem orientadas de acordo a disposição das linhas sísmicas, evidenciando uma possível reposta que não fosse originaria da orientação das linhas sísmicas e/ou procedimentos de interpolação.

Resultados Fase Instantânea:

Regionalmente, notam-se fortes anomalias negativas pontuais próximos a zona em que plataforma continental muda sua orientação E-W para SE-NW. (Figura 18).

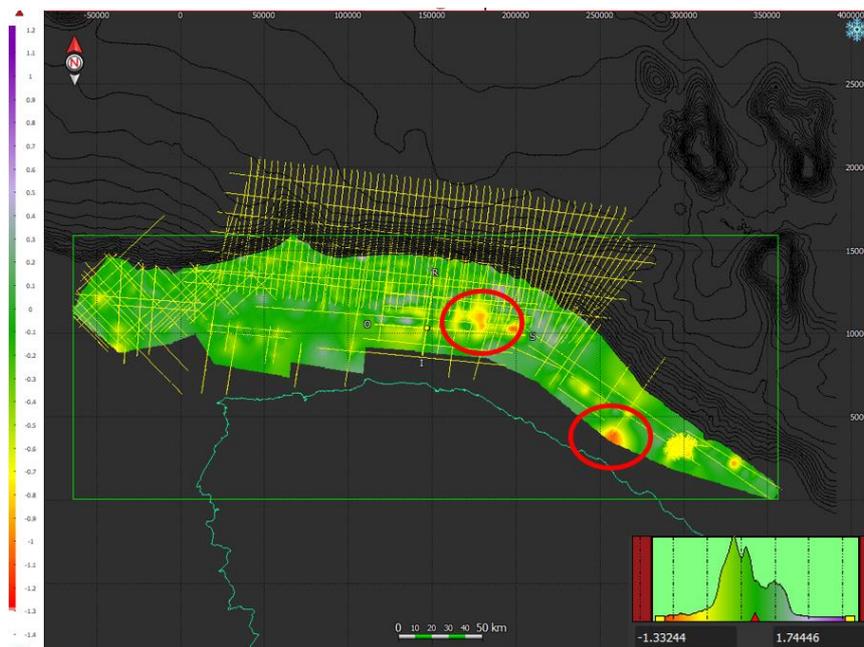


Figura 18-Superfície relativa ao fundo do mar com a aplicação do atributo sísmico de fase instantânea

Ao sobrepor este mapa com linhas batimétricas tem-se que a anomalia mais a Oeste pode estar relacionada a um alto topográfico. (Figura 19)

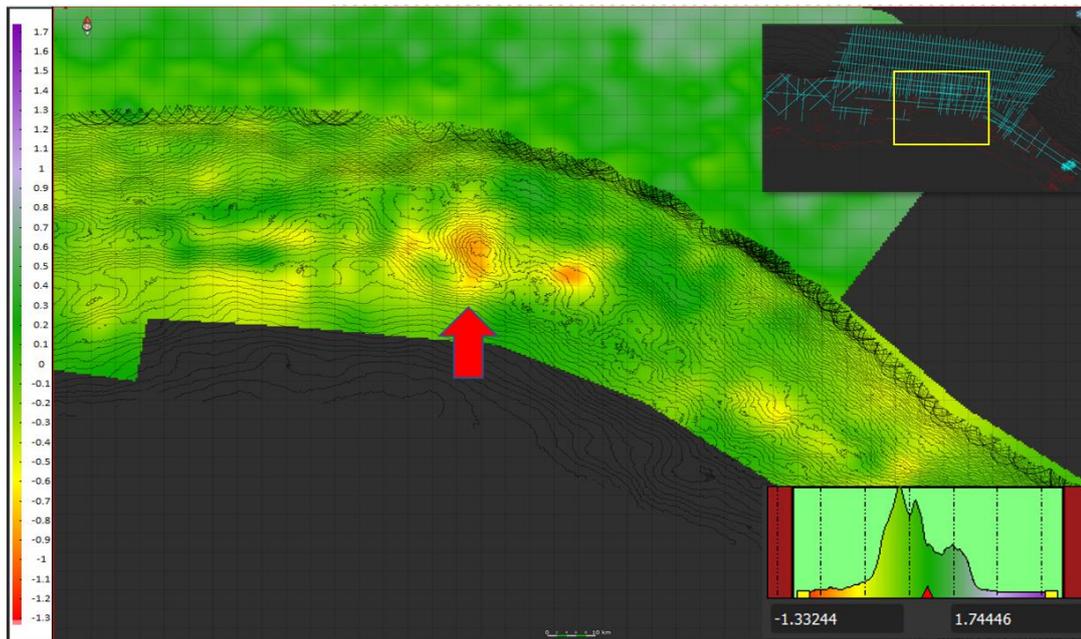


Figura 19-Sobreposição da superfície relativa ao fundo do mar com o atributo sísmico de fase instantânea com um mapa batimétrico.

Resultados Frequência Instantânea:

Com anomalias que se diferem bastante das apresentadas na fase instantânea, neste caso, nota-se uma um lineamento de anomalias de baixa frequência de orientação E-W, quase paralelas a quebra da plataforma. (Figura 20). Ao se analisar os resultados utilizando o mapa batimétrico, tem-se uma configuração que preliminarmente não se correlaciona com a topografia do fundo do marinho, nos remetendo a possibilidade dessas anomalias estarem refletindo algum tipo de mudança sedimentação/morfologia do fundo (Figura 20).

Sobrepondo este mapa com o de distribuição de sedimentos, nota-se uma disposição preferencial de material cascalhoso e de origem bioclástica sendo predominante na faixa de 18- 28 Hertz., restando as outras zonas (anomalias abaixo de 16 Hertz) como sendo sedimentos arenosos de origem litoclástica (Figura 21).

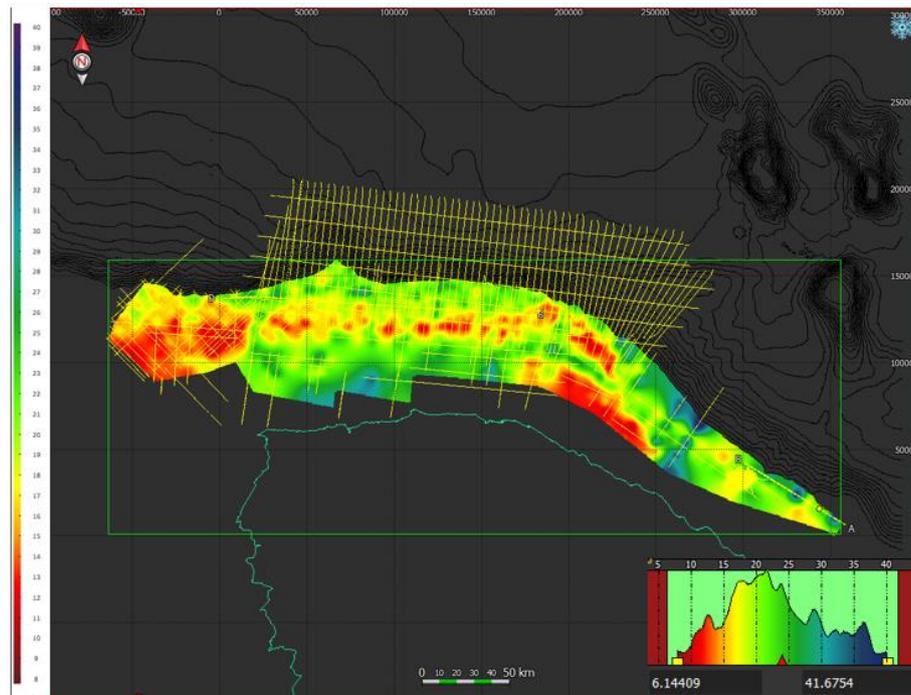


Figura 20-Superfície relativa ao fundo do mar com a aplicação do atributo sísmico de frequência instantânea

M,

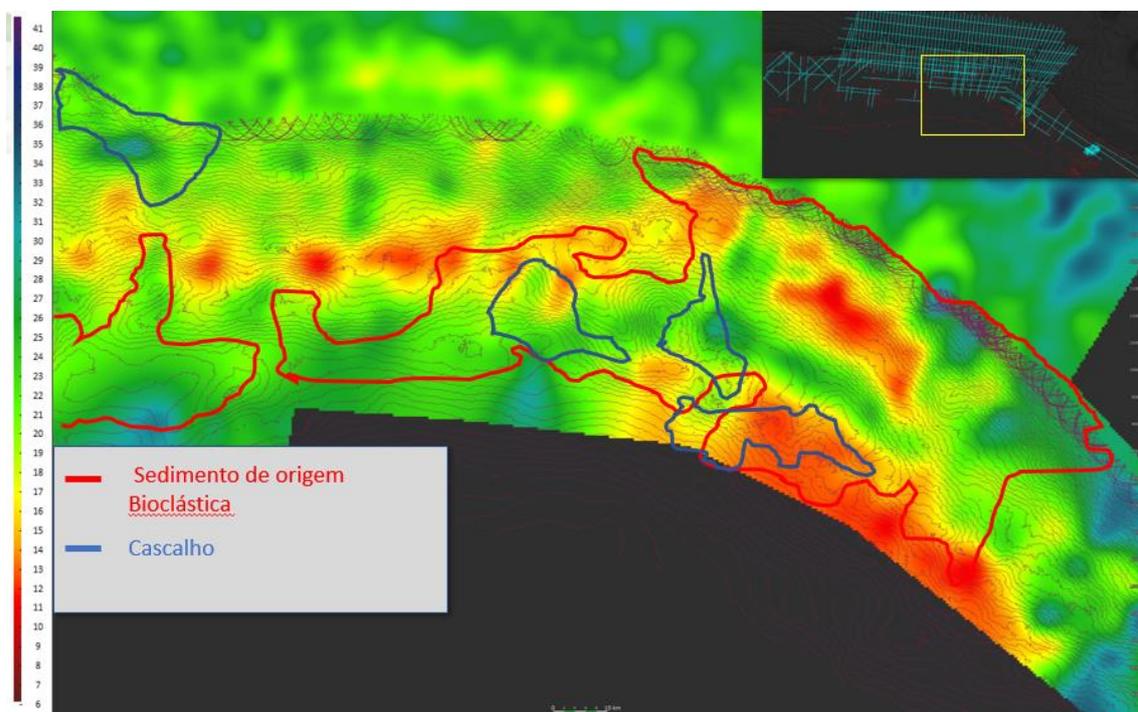


Figura 21-Sobreposição do mapa de frequência instantânea com as principais feições de distribuição de sedimento geradas na mesma região.

4.4 Correlações dados sedimentos X Atributos sísmicos

A partir da correlação entre os dados de atributos sísmicos e dos sedimentos encontrados na área de estudo, chegou-se aos seguintes resultados.



Figura 22- Tabela mostrando as principais correlações encontradas e seus respectivos valores de p-valor

Inicialmente, nota-se uma relação inversamente proporcional, entre a areia e o cascalho (-0.98), que de acordo com estudos realizados anteriormente na região e o mapa de distribuição de sedimentos gerados estão dentro do esperado para a região. Dando continuidade as melhores correlações encontradas, a configuração que obteve a melhor resposta foi a da frequência instantânea com o teor de carbonato (0.71). Seguindo tem-se a fase instantânea respectivamente tendo correlação mediana com o teor de areia (0.64) e cascalho (-0.64)

Analisando também os resultados de p-valor, todas as maiores correlações ocorrem com os valores de p-valor abaixo do valor ideal de 0.05, sendo 0.014 para a relação frequência instantânea-carbonato, 0.034 para a fase instantânea-cascalho e -0.034 para fase instantânea-areia.

Expandindo esse modelo de correlações para os diferentes conjuntos de busca, tem-se uma diminuição bastante expressiva das correlações em função da distância das linhas sísmicas. A única correlação que se manteve em todos os casos foi a de areia e cascalho. Vale ressaltar também que mesmo os conjuntos amostrais estarem apresentando nas análises de histograma e curva de frequência semelhanças visuais, os dados de correlação ainda estão muito longe de uma correlação de nível mediana.

4.5 Construção modelo final e mapeamento das construções biogênicas

Partindo-se do princípio de que as anomalias vistas nos atributos sísmicos poderiam estar relacionadas com a textura/morfologia do fundo marinho, foi feito um delineamento das principais faixas de anomalia que refletiriam o tipo de sedimento de fundo na região. A sobreposição de anomalias que estivessem associadas a fundos cascalhosos carbonáticos e em junção com o mapa batimétrico, mostrou 4 possíveis zonas de construções biogênicas. Observa-se nos trabalhos da plataforma continental do Ceará de Vital et al (2010) e Testa e Bosence (1998,1999) resultados semelhantes, onde estas possíveis formações poderiam ser associadas a recifes de algas vermelhas (*Rhodophyta*).

Na Figura 23 tem-se as faixas de anomalias escolhidas. Vale ressaltar que outros pontos de interseção foram encontrados e descartados, pois não atenderam a valores mínimos de profundidade, invalidando os mesmos para a formação de construções biogênicas.

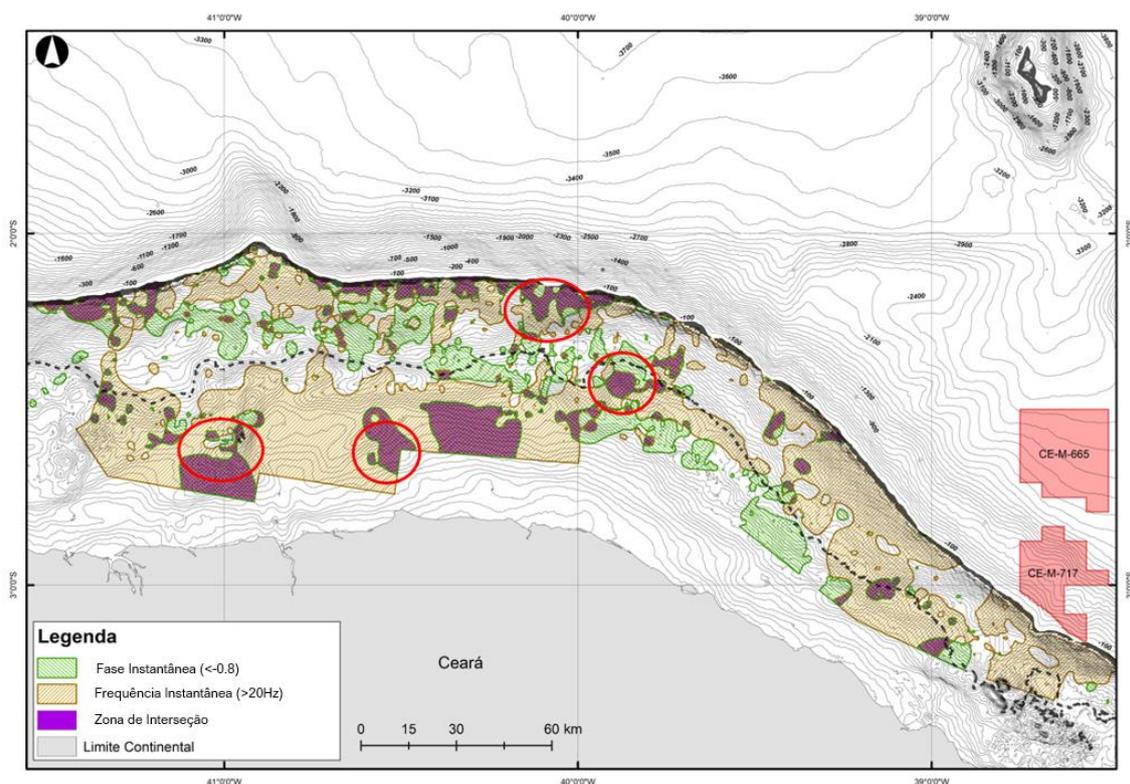


Figura 23-Mapa de sobreposição de anomalias onde foi possível identificar 4 áreas com possíveis construções biogênicas

5 Conclusões

A junção da análise de atributos sísmicos com informações texturais e composicionais dos sedimentos do fundo marinho se mostrou uma interessante alternativa regional para o mapeamento da distribuição de sedimentos. Evidencia-se que os atributos de frequência instantânea e fase instantânea tiveram uma eficaz correlação entre o teor de carbonato e a distribuição de sedimentos cascalhosos, que para este estudo foi de extrema relevância no mapeamento preliminar de possíveis construções biogênicas.

Em outro aspecto, a diminuição das taxas de correlação entre sedimento e atributos sísmicos em função das distâncias de buscas se mostrou um fator relevante no planejamento das regiões de amostragem dos sedimentos de fundo. Recomenda-se novas amostragens respeitando-se uma distância mínima de uma linha sísmica

De forma também a colaborar com a confirmação das construções biogênicas mapeadas, é de importância que sejam amostrados posteriormente

pontos fora das zonas de anomalias. A finalidade deste processo seria de confirmar ou refutar os resultados desta análise, de forma a trazer parâmetros adicionais para a melhoria das técnicas e metodologias aqui empregadas.

Tendo em mente a utilização desta superfície sísmica como produto inicial para planos de amostragem, a aplicação deste método se vale também como metodologia inicial para futuras investigações diretas e indiretas mais localizadas, minimizando esforços amostrais e otimizando custos.

6 Referências Bibliográficas

AYRES NETO, A. Uso da Sísmica de Reflexão de Alta Resolução e da Sonografia na Exploração Mineral Submarina. Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 18 (3),p. 241-256. 2000.

BARNES, Arthur E. (Ed.). Handbook of poststack seismic attributes. Society of Exploration Geophysicists, 2016.

BARRETO, H.T; SUMMERHAYES, C.P. Oceanography and suspended matter off Northeastern Brazil. Journal of Sedimentary Petrology, Tulsa, v. 45, n. 4, p. 822- 833, 1975.

BROWN, A. R.; Understanding seismic attributes. Geophysics. Dallas, v. 66, n. 1, p.47-48, 2001.

1988-CARANNANTE et al. Carbonate litofácies as paleolatitude indicators: problems and limitations. SedimentaryGeology, Amsterdam, v. 60, p. 333-346, 1988

COUTINHO, P.N. Sedimentos carbonáticos da Plataforma Continental Brasileira. Revista de Geologia, Fortaleza, v.6, p. 65-73, 1995

FERREIRA, J.M et al. Superposition of local and regional stress in northeast Brazil: evidence from focal mechanisms around the Potiguar marginal basin. GeophysicsJournalInternational. London, v. 134, p. 341-355, 1998.

FREIRE, G.S.S. Geologia marinha da plataforma continental do Ceará. 1985. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1985.

FREIRE, G.S.S.; CAVALCANTI, V.M.M. Cobertura sedimentar quaternária da plataforma continental do Estado do Ceará. Fortaleza: DNPM/LGMA-UFC, 1998. 42p.

GUO, Qiang. Tuning, AVO, and flat-spot effects in a seismic analysis of North Sea Block F3. 2014.

JAKOBSSON, M. Submarine glacial landform distribution in the central Arctic Ocean shelf–slope–basin system. Geological Society, London, Memoirs, v. 46, n. 1, p. 469-476, 2016.

LANCASTER, Steve; WHITCOMBE, David. Fast-track 'coloured' inversion. In: SEG Technical Program Expanded Abstracts 2000. Society of Exploration Geophysicists, 2000. p. 1572-1575.

LARSONNEUR, C., 1977, La cartographie des depots meubles sur le plateau continental français: methode mise au point et utilisé en Manche: Journal Recherche Oceanographic, v. 2, p. 33–39

KEAREY, Philip, Michael Brooks, and Ian Hill. *Geofísica de exploração*. Oficina de textos, 2009.

MAIA, L.P. Procesos costeros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE-Brasil): Implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral. 1998. 269f. Tese (Doutorado) - Programa Doctorado de Ciencias del Mar, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, 1998.

MARFURT, K. J. Seismic Attributes as the Framework for Data Integration Throughout the Oilfield Life Cycle. [s.l: s.n.].

MATOS, R.M.D. The Northeast Brazilian Rift System. Tectonics, Washington, v. 11, n. 4, p. 766-791, 1992.

MATOS, R.M.D. History of the northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break-up between Brazil and West Africa. In: CAMERON et al. (eds). The oil and gas habitats of the South Atlantic. London: Geological Society of London, 1999. p. 55-73. (Geological Society of London Special Publication, 153

MATOS, R.M.D. Tectonic Evolution of the Equatorial South Atlantic. In: MOHRIAK, W.U.; TALWANI, M. (eds). Atlantic Rifts and Continental Margins. Washington: American Geophysical Union, 2000. p. 331-354. (Geophysical Monograph, 115).

MILLIMAN, J.D. Role of calcareous algae in Atlantic Continental Margin sedimentation. In: FLUEGEL, E. (ed.). Fossil algae, recent results and developments. Berlin: Springer-Verlag, 1977. p. 233-246.

PINDELL et al. A plate-kinematic framework for models of Caribbean evolution. Tectonophysics, Amsterdam, n.155, p. 121-138, 1988.

SCOTESE, C.R.; GAHAGAN, L.M.; LARSON, R.L Plate tectonic reconstructions of the Cretaceous and Cenozoic ocean basins. Tectonophysics, Amsterdam, n.155, p. 27-48, 1988

SHEPARD, F.P., 1954, Nomenclature based on sand-silt-clay ratios: Journal of Sedimentary Petrology, v. 24, p. 151-158.

SILVA FILHO, W. F. "Domínios morfoestruturais da plataforma continental do Estado do Ceará." *Universidade Federal do Rio Grande do Sul* (2004).

TANER, M. Turhan. Attributes Revisited. Rock Solid Images. Houston, Texas, p. 3 - 27, 1992.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R.E. Applied Geophysics. 2 ed. Cambridge University Press, 1990.

TESTA, V.; BOSENCE, D. W. J. Carbonate-Siliciclastic Sedimentation on High-Energy, Ocean-Facing, Tropical Ramp, NE Brazil. In: WRIGHT, V. P.; BURCHETTE, T. P. (Ed.). Carbonate Ramps. Geol. Soc. London Spec.Pub., v. 149, p. 55-71, 1998.

TESTA, V.; BOSENCE, D. W. J. Physical and Biological Controls on the Formation of Carbonate and Siliciclastic Bedforms on the North-East Brazilian Shelf. Sediment., v. 46, p. 279-301, 1999

UNTERNEHR, P. et al. South Atlantic fits and intraplate boundaries in Africa and South America. Tectonophysics, Amsterdam, v. 155, p. 169-179, 1988.