UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ANA LAURA LORDI DIAS

ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE ATRIBUTOS SÍSMICOS INSTANTÂNEOS: UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO ARCABOUÇO TECTÔNICO-ESTRUTURAL DA BACIA DE PELOTAS

Caçapava do Sul

2018

ANA LAURA LORDI DIAS

ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE ATRIBUTOS SÍSMICOS INSTANTÂNEOS: UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO ARCABOUÇO TECTÔNICO-ESTRUTURAL DA BACIA DE PELOTAS

Trabalho de Conclusão de Curso II de Geofísica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Éverton Frigo

Coorientador: Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima

Caçapava do Sul

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

L866a Lordi Dias, Ana Laura ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE ATRIBUTOS SÍSMICOS INSTANTÂNEOS: UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO ARCABOUÇO TECTÔNICO-ESTRUTURAL DA BACIA DE PELOTAS / Ana Laura Lordi Dias. 108 p. Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2018. "Orientação: Prof. Dr. Éverton Frigo". 1. Atributos Sísmicos. 2. Migração . 3. Cone do Rio Grande. 4. Bacia de Pelotas. I. Título.

ANA LAURA LORDI DIAS

ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE ATRIBUTOS SÍSMICOS INSTANTÂNEOS: UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO ARCABOUÇO TECTÓNICO-ESTRUTURAL DA BACIA DE PELOTAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Geofísica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Titulo de Bacharel em Geofísica.

Área de concentração: Geofísica

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 23/11/2019

Banca examinadora:

Prof. Dr. Éverton Frigo Orientador UNIPAMPA

Prof Dr. Felipe Guadagnin UNIPAMPA

Prof. Dr. Mário Jesus Tomas Rosales UNIPAMPA

Dedico este trabalho aos meus pais Ana Paula e Cassio e à minha irmã Maria Julia, que sempre me apoiaram e incentivaram ao longo da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente a Deus por ser meu alicerce e sempre se mostrar presente em todos os dias da minha vida, nos momentos fáceis e difícies.

Agradeço a toda minha família e amigos de Espírito Santo do Pinhal (SP), com quem tive pouco contato durante estes 4 anos devido à distância, mas que sempre torceram por mim. Em especial aos meus avós que sempre me colocam em suas orações diárias.

Agradeço também à minha irmã Maria Julia pelos momentos de incentivo, amor, pelos momentos de "Você não vai sair comigo na rua com essa roupa não!", pelas risadas e todos os bons momentos que passamos juntas. Tenho muito orgulho de quem você é e espero que eu sempre possa ser um bom exemplo para você.

Agradeço muito aos amados e maravilhosos pais, de quem tenho imenso orgulho e que moldaram tudo o que sou hoje. Obrigada por sempre me incentivarem em todos os momentos da vida, principalmente a fazer aquilo que gosto. Obrigada pelos ensinamentos, experiências de vida, repreensões quando necessário, por me financiar em Caçapava e por acreditarem e confiarem em mim. Gostaria que todas as palavras fossem o suficiente para dizer o quão grata sou. Obrigada por tudo, esta conquista é por mim e por vocês!

Agradeço a esta pessoa maravilhosa que é meu namorado e em breve também geofísico, Matheus, pelos momentos de apoio durante os 4 anos em Caçapava, por sempre me mostrar a ser positiva em relação às coisas, por me ensinar a manter a calma quando preciso, pelos momentos de alegria, amor, parceria e companheirismo na vida e nos estudos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Éverton Frigo pelas revisões deste trabalho, e em especial ao Prof. Dr. Marcus Vinicius A. G. de Lima que me deu a oportunidade de trabalhar com sísmica, fazendo deste meu método geofísico preferido e que mesmo estando longe me ajudou neste trabalho.

Agradeço ainda aos momentos de parceria nos estudos com meus colegas de sala, à Unipampa, aos professores que aceitaram participar da banca e contribuir com este trabalho: Prof. Dr. Felipe Guadagnin e também Prof Dr. Mário J. T. Rosales, o qual me deu a oportunidade de trabalhar e aprender muito sobre métodos elétricos (meu segundo método geofísico preferido) e aos outros

maravilhosos professores da universidade, que muito contribuiram para minha formação profissional.

Agradeço à cidade de Caçapava do Sul (RS) e sua geodiversidade (que muito contribuiram nas aulas de campo), e às seus cidadãos muito hospitaleiros e sempre dispostos a ajudar, que aqui conheci. Caçapava sempre será minha segunda casa!

Agradeço ainda à Sociedade Brasileira de Geofísica, pelo financiamento deste trabalho.

A todos vocês, muito obrigada!

"A primeira e melhor vitória é conquistar a si mesmo."

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo a aplicação de atributos sísmicos instantâneos, a partir de seções sísmicas 2D pós-stack da Bacia de Pelotas, na região do Cone do Rio Grande, cedidas pela Agência Nacional do Petróleo. A Bacia de Pelotas começou seu desenvolvimento por um processo de rifteamento há 135 Ma, no contexto de formação do Oceano Atlântico. Nesta bacia desenvolveu-se uma feição sedimentar conhecida como Cone do Rio Grande, o qual foi formado por sedimentos depositados a uma alta de sedimentação, propiciando a fomação de matéria orgânica. A aplicação dos atributos nos dados sísmicos localizados nessa região foram feitos através de ferramentas disponíveis no pacote Seismic Un*x. Estes atributos são baseados no conceito de traço sísmico complexo, explorando a fase do sinal sísmico (componente imaginária) através da transformada de Hilbert, que a partir deste podem ser derivados os atributos definidos como envelope, fase e frequência do traço. Estas operações matemáticas, ao serem aplicadas numa seção sísmica (2D) ou num volume (3D) são capazes de evidenciar os aspectos estruturais e geológicos, sendo utilizados principalmente para a identificação de falhas e na detecção de características estratigráficas relativamente sutis, facilitando a interpretação. O imageamento resultante da aplicação dos atributos permitiu realçar os refletores, que orientaram o rastreamento dos horizontes e falhas, sendo possível também, definir horizontes indicadores de hidratos de gás (BSR – Bottom Simulating Reflector) em todas as seções entre 500 a 3.000 m de profundidade, além de estruturas relacionadas à eles, como estruturas dômicas e pockmarks. A aplicação da técnica de migração dos dados sísmicos para profundidade, a partir de um modelo de velocidades gerado pelo rastreamento dos horizontes, reposicionou os refletores em subsuperfície que foram deslocados por estruturas difratoras como falhas, permitindo conhecer a profundidade das estruturas localizadas, e assim representar mais adequadamente o meio geológico.

Palavras-chave: Atributos Sísmicos, Migração, Cone do Rio Grande, Bacia de Pelotas.

ABSTRACT

The present work aims the application of instantaneous seismic attributes, from 2D post-stack seismic sections of the Pelotas Basin, in the Rio Grande Cone region, provided by the National Petroleum Agency. The Pelotas Basin began its development by a process of rifting about 135 Ma ago, in the context of Atlantic Ocean's formation. In this basin there is a sedimentary feature known as the Rio Grande Cone, which was formed by sediments deposited at a high sedimentation, propitiating the formation of organic matter. The application of the attributes in the seismic data located in this region, was done through tools available in the Seismic Un * x package. These attributes are based on the concept of a complex seismic trace, exploring the phase of the seismic signal (imaginary component) through the Hilbert transform, which can be derived the attributes defined as envelope, phase and frequency of the trace. These mathematical operations, when applied in a seismic section (2D) or in a volume (3D), are capable of highlighting structural and geological aspects, being used mainly for the identification of faults and the detection of relatively subtle stratigraphic characteristics, facilitating interpretation. The image resulting from the application of the attributes allowed highlighting reflectors, which guided the tracking of horizons and faults, and it was also possible to define gas hydrating indicator (BSR) horizons in all sections, as well as structures related to them, as domes structures and pockmarks. The application of the technique of migration of the seismic data to depth, from a velocity model generated by the tracking of the horizons, repositioned the reflectors in subsurface that were displaced by diffractor structures as faults, allowing to know the depth of the localized structures, and thus represent more suitably the geological environment.

Keywords: Seismic attributes, Migration, Rio Grande Cone, Pelotas Basin.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Área de Estudo com as linhas sísmicas e batimetria19
FIGURA 2 - Modelo de fragmentação de uma massa continental e desenvolvimento de margens continentais passivas. Em (A) é mosootrado a megassequência pré- rifte, (B) a megassequência sin-rifte, (C) a megassequência transicional e (D) a megassequência pós-rifte
FIGURA 3 - Sequências deposicionais definidas para a Bacia de Pelotas, onde A representa a Fase Rifte; as sequências B a F representam a cunha de margem passiva da megassequência transgressiva (Aptiano-Paleoceno superior); as sequências G a Q mostram o desenvolvimento da cunha de margem passiva da megassequência regressiva (Paleoceno superior - Recente)
FIGURA 4 - Carta Estratigráfica da Bacia de Pelotas23
FIGURA 5 - Mapa de localização do Cone do Rio Grande, na Bacia de Pelotas25
FIGURA 6 - Anomalia de amplitude destacando a base da camada de gás na Bacia de Pelotas
FIGURA 7 – Ocorrências conhecidas (círculos amarelos) e inferidas através de BSRs (círculos vermelhos) de hidratos de gás e em (B) a espessura estimada da zona de estabilidade de hidratos (GHSZ) em metros
FIGURA 8 – Limite de profundidade para encontrar hidratos de gás (500 m)27
FIGURA 9 – Levantamento sísmico marinho29
FIGURA 10 – Modelo Convolucional do traço sísmico
FIGURA 11 – Representação de um traço sísmico complexo
FIGURA 12 – Diagrama da parte real (a), e em quadratura (b) de um traço sísmico. Também é mostrado o envelope (curva pontilhada em (a e b)), fase (c) e a frequência instantânea (d) com a frequência média ponderada (linha pontilhada)
FIGURA 13 - Dado sísmico real contendo um <i>bright spot</i> e a aplicação dos atributos de (a) Envelope, (b) Fase Instantânea, (c) Frequência Instantânea, (d) Frequência Instantânea suavizada
FIGURA 14 – Fluxograma de Processamento40

FIGURA 1	FIGURA 15 – Janela de criação de um novo projeto (Survey)4						43		
FIGURA 1	6– J	ane	la de cor	nfiguração	do levantan	nento			43
FIGURA 1 preto) e ra	7 – Istrea	Jan ar fa	iela da 3 Ihas (ma	S <i>urvey</i> inc arcação er	licando onde n vermelho).	e carre	egar	os dados (marcação em 44
FIGURA realizada o	18 – da pa	- Se arte	eção sís mais pro	mica orig ofunda da	inal J99B13 bacia em dir	7 com eção à	n dire plata	eção NE-S aforma)	W (aquisição 45
FIGURA realizada o	19 – da pa	- Se arte	eção sís mais pro	mica orig ofunda da	inal J99B18 bacia em dir	7 com eção à	n dire plata	eção NE-S aforma)	W (aquisição 46
FIGURA 2	20 – 3	Seçá	ão sísmio	ca original	0231-0488	(SW-N	E)		46
FIGURA 2	1 – 3	Seçá	ão sísmio	ca original	J00B291 (S	W-NE))		47
FIGURA 2	2 – 3	Seçá	ão sísmio	ca original	J00B351 (S	W-NE))		47
FIGURA 2	3 – 3	Seçá	ão sísmio	ca original	J00B166A (NW-SI	E)		48
FIGURA 2 realizada o	24 – da pa	- Se arte	eção sís mais pro	mica orig ofunda da	inal J99B19 bacia em dir	4 com eção à	n dire plata	eção SE-N aforma)	W (aquisição 49
FIGURA 2 realizada o	25 – da pa	- Se arte	eção sís mais pro	mica orig ofunda da	inal J00B22 bacia em dir	2 com eção à	n dire plata	eção SE-N aforma)	W (aquisição 49
FIGURA 2	8 – 8	Seçá	ão sísmio	ca original	J99B258 (N	W-SE))		50
FIGURA 2	27 – 3	Seçá	ão sísmio	ca original	J00B336 (N	W-SE))		50
FIGURA aplicados.	28	_	Seção	sísmica	J99B137	com	OS	atributos	instantâneos 51
FIGURA aplicados.	29	_	Seção	sísmica	J99B187	com	os	atributos	instantâneos 52
FIGURA aplicados.	30	-	Seção	sísmica	0231-0488	com	os	atributos	instantâneos 53
FIGURA aplicados.	31	_	Seção	sísmica	J00B291	com	os	atributos	instantâneos 54
FIGURA aplicados.	32	_	Seção	sísmica	J00B351	com	os	atributos	instantâneos 55
FIGURA aplicados.	33	_	Seção	sísmica	J00B166A	com	OS	atributos	instantâneos 56

FIGURA 37 – Seção sísmica J00B336 com os atributos instantâneos aplicados......60

FIGURA 39 - Seção sísmica mostrando o BSR proeminente e diversas estruturas de escape de gás biogênico que terminam em *Pockmark.....*63

FIGURA 40 - Seção sísmica da Bacia de Pelotas com três seepages associados a uma zona de escorregamento......63

FIGURA 45 – Seção sísmica 0231-0488 (A) mostrando refletores falhados, *pockmark* e o BSR, obtidos através do atributo de Envelope e em (B) *pockmarks* obtidos pelo atributo de Fase instantânea na seção J99B187......68

FIGURA 46 – Seção sísmica J00B258 em escalas de cores diferentes, realçando a região onde se localiza o BSR, as mudanças de frequência e o refletor do embasamento, falhado nas zonas de sombras......70

FIGURA 47 – Seção sísmica 0231-0488 com os horizontes rastreados, sendo o primeiro refletor (em azul) correspondente ao fundo do mar e o segundo (em laranja) ao BSR. As marcações em amarelo correspondem às falhas......71

FIGURA 57 – Correlação entre os refletores das linhas J00B351, J99B194, 0231- 0488, J99B187 e J99B137, destacando (em laranja) o BSR e o embasamento (em verde)
FIGURA 58 – Correlação entre os refletores das linhas J00B291, J00B351, J00B166A, J99B194, J00B222, J00B291 e J00B33678
FIGURA 59 – Correlação entre os refletores das 10 seções (destaque para o BSR, em laranja)79
FIGURA 60 – Modelo de Velocidades da linha J00B166A, em tempo, sendo a cor azul corresponte à água, verde correspondente ao pacote sedimentar e vermelho ao embasamento
FIGURA 61 – Modelo de Velocidades da linha J00B166A, em profundidade81
FIGURA 62 – Seções sísmicas com o atributo Envelope indicando o refletor BSR (linha tracejada em laranja)82
FIGURA 63 – Seção sísmica J99B137 (SW-NE) migrada para profundidade83
FIGURA 64 – Seção sísmica J99B187 (SW-NE) migrada para profundidade85
FIGURA 65 – Seção sísmica 0231-0488 (SW-NE) migrada para profundidade87
FIGURA 66 – Seção sísmica J00B291 (SW-NE) migrada para profundidade89
FIGURA 67 – Seção sísmica J00B351 (SW-NE) migrada para profundidade91
FIGURA 68 – Seção sísmica J00B166A (NW-SE) migrada para profundidade93
FIGURA 69 – Seção sísmica J99B194 (NW-SE) migrada para profundidade95
FIGURA 70 – Seção sísmica J00B222 (NW-SE) migrada para profundidade97
FIGURA 71 – Seção sísmica J99B258 (NW-SE) migrada para profundidade99
FIGURA 72 – Seção sísmica J00B336 (NW-SE) migrada para profundidade101

LISTA DE SIGLAS

- ANP Agência Nacional do Petróleo
- BDEP Banco de Dados de Exploração e Produção
- BSR Bottom Simulating Reflector
- GHSZ Gas Hydrate Stability Zone
- SEG-Y Formato padrão de dados sísmicos, desenvolvido pela Society of Exploration Geophysicists (SEG)
- SU Seismic Un*x

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo Geral	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3 ÁREA DE ESTUDO	18
4 CONTEXTO GEOLÓGICO	19
4.1 Cone do Rio Grande	24
5 MATERIAIS E MÉTODOS	28
5.1 Sísmica de Reflexão	
5.1.1 Impedância Acústica	29
5.1.2 Refletividade (Coeficiente de Reflexão)	30
5.1.3 Traço Sísmico	
5.2 Atributos Sísmicos Instantâneos	33
5.2.1 Envelope ("Intensidade de Reflexão")	35
5.2.2 Fase Instantânea	35
5.2.3 Frequência Instantânea	36
5.3 Migração	
6 PROCESSAMENTO DOS DADOS	39
6.1 Conversão dos Dados	40
6.2 Aplicação dos Atributos Instantâneos	41
6.3 Rastreamento dos horizontes	42
6.4 Migração para profundidade	44
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
7.1 Análise e Interpretação dos Atributos Instântaneos	45
7.2 Rastreamento dos horizontes e falhas	70

7.3 Correlação entre os horizontes	73
7.4 Migração para profundidade	80
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

1 INTRODUÇÃO

A Bacia de Pelotas começou seu desenvolvimento durante a formação do Oceano Atlântico, por um processo de rifteamento, há 135 Ma (ASMUS, 1975). Na porção *offshore* desta bacia há uma feição morfológica, chamada Cone do Rio Grande, onde é inferida a presença de hidratos de gás (FONTANA, 1994).

O método sísmico é um método geofísico essencial na indústria dos hidrocarbonetos, sendo indispensável para a exploração de bacias petrolíferas. Segundo Yilmaz (2000), a análise sísmica é dividida em aquisição sísmica, processamento sísmico e interpretação sísmica, sendo os dois últimos abordados neste trabalho.

A fim de se obter uma imagem sísmica que seja representativa do meio geológico, é necessário entender a propagação do campo de onda sísmico através do meio de subsuperfície e sua interação com estruturas geológicas complexas, a fim de se aplicar o processamento adequado aos dados para a posterior interpretação das imagens.

A análise das seções sísmicas é de extrema importância para a indústria petrolífera, pois, geralmente é a partir deste estudo que se define pontos de interesse, como reservas de óleo e gás, e se verifica a viabilidade de produção. Neste contexto, os atributos sísmicos desde sua introdução na década de 1970, têm tornado-se uma importante ferramenta diagnóstica na caracterização das propriedades petrofísicas e litológicas dos reservatórios, desempenhando atualmente um papel chave na tecnologia de exploração sísmica. A análise de atributos sísmicos é empregada pela interpretação em todas as escalas, desde a análise de sistemas deposicionais regionais até o detalhamento de feições sutis no mapeamento estrutural, estratigrafia e propriedades físicas das rochas. Um dos atributos sísmicos mais utilizados na detecção de características estratigráficas visualmente imperceptíveis são aqueles definidos como instantâneos.

Diversos autores, como Francelino (2011), fizeram uso de atributos sísmicos, a fim de ressaltar características estruturais em bacias sedimentares. Segundo este autor, a análise de atributos de similaridade e curvatura permitiram melhorias na visualização e continuidade de falhas e fraturas possibilitando observar sua orientação, no campo de petróleo de Sirizinho, localizado na Bacia Sergipe-Alagoas. Segundo Francelino (2011), a caracterização dessas heterogeneidades geológicas tem grande importância para o gerenciamento de reservatórios, visto que controlam o espaço de armazenamento e fluxo do fluido. Deste modo, o entendimento e quantificação dessas estruturas pode provocar um impacto econômico considerável durante a prospecção de hidrocarbonetos.

Em Lima (2012), foi possível a geração de um modelo de porosidade 3D, que caracterizou o reservatório do Campo de Namorado em regiões de altos, médios e baixos valores de porosidade. A partir da análise multivariada de atributos sísmicos em conjunto com perfis de porosidade efetiva, foi possível contribuir para a caracterização dos reservatórios.

No trabalho de Aguiar (2017), a utilização do atributo de envelope, pertencente ao grupo de atributos instantâneos, contribuiu para identificar assinaturas na seção sísmica (refletores BSR), associadas à existência de hidratos de metano na bacia da Foz do Amazonas. O mesmo foi possível no trabalho de Barros (2009), no qual na interpretação dos perfis sísmicos obtidos, o BSR (*Bottom Simulating Reflector*) foi o principal padrão sísmico relacionado à ocorrência de hidratos de gás encontrado na região do Cone do Rio Grande. Segundo o autor, estima-se que a zona de estabilidade dos hidratos de gás ocorre em uma profundidade de lâmina d'água que varia de 930 a 3.000 m, se estendendo por uma área de direção alongada NE-SW, de aproximadamente 40.000 km².

Neste contexto, o presente trabalho propõe a aplicação de atributos sísmicos instantâneos a partir de seções 2D pós-*stack* da Bacia de Pelotas, na região conhecida como Cone do Rio Grande, feitos através de ferramentas disponíveis no pacote *Seismic Un*x* (COHEN & STOCKWELL, 2017).

Por ser uma bacia com potencial petrolífero, a Bacia de Pelotas gera expectativas em relação à exploração de hidrocarbonetos, apesar de poucos estudos realizados na área, quando comparada a outras bacias brasileiras. Desta forma, este trabalho se desenvolve através da aplicação de atributos sísmicos, justificando-se por contribuir com a análise estrutural e geológica da bacia, melhorando a resolução sísmica e a interpretação das seções, que são essenciais para o estudo de reservatórios. Assim, a utilização dos atributos não só reduz o risco de exploração, mas fornece uma melhor compreensão do reservatório, levando ao seu gerenciamento ideal.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo geral aplicar a técnica de atributos sísmicos em dados pós-stack 2D da porção *offshore* da Bacia de Pelotas, na região do Cone do Rio Grande, a fim de evidenciar e realçar descontinuidades sísimicas relacionadas com estruturas geológicas, tais como falhas e estruturas relacionadas com hidratos de gás, visto que a presença destes é inferida na região. E também avaliar a aplicabilidade dos atributos como ferramenta para análise quantitativa e qualitativa da interpretação sísmica.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Aplicar os atributos sísmicos nas seções 2D pós-stack da bacia, a fim de melhorar o imageamento das seções sísmicas e correlacionar feições e ou horizontes identificados com estruturas geológicas como falhas, escapes de gás, refletores BSR e outras estruturas relacionadas aos hidratos.
- Realizar o rastreamento (*tracking*) dos horizontes, para que estes sejam visivelmente melhorados após a aplicação dos atributos e utilizados para a geração de um modelo de velocidades para a migração.
- Realizar a migração dos dados 2D pós-stack com base nos horizontes interpretados e modelo de velocidades estimados a partir deles, com o intuito de reposicionar os refletores em escala de profundidade.

3 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia de Pelotas está localizada no extremo sul da Margem Continental Brasileira (Figura 1), sendo delimitada ao norte pela a Bacia de Santos pela plataforma de Florianópolis e ao sul pelas bacias da Margem Continental do Uruguai.

Possui parte sobre a crosta oceânica e parte sobre a crosta continental, compreendendo uma área de cerca de 210.000 km², até a lâmina d'água de 2.000 m (ABREU, 1998). A bacia acumulou sedimentos que deram origem a rochas como arenitos e folhelhos, além de conglomerados, rochas basálticas extrusivas e carbonatos (FONTANA, 1996).



FIGURA 1 - Área de Estudo com as linhas sísmicas e batimetria Fonte: Autora, 2018 (Base de dados: Nereus, 2018)

4 CONTEXTO GEOLÓGICO

O Atlântico Sul se desenvolveu por volta de 135 Ma, afastando a América do Sul do continente africano através da ruptura continental do NeojurrássicoEocretácio, que ocasionou a fragmentação do supercontinente Gondwana, sendo o início desta separação marcado por eventos vulcânicos de natureza basáltica. Desta forma, houve a formação de margens passivas e o surgimento de muitas bacias sedimentares nas áreas continentais afetadas e pelo falhamento da crosta (ASMUS, 1975). As bacias de margem continental brasileira, como a Bacia de Pelotas (do tipo rifte) situada na Província Costeira do Rio Grande do Sul, foram formadas neste contexto.

O modelo que descreve a formação de margens continentais passivais proposto por Asmus *et al.* (1972) é caracterizado inicialmente por vales de afundamento, em ambientes ainda continentais, chamados riftes. Mais tarde, com o afastamento apenas inicial dos continentes, o ambiente de sedimentação é de águas rasas com muita evaporação. Finalmente, com o oceano aberto, as margens continentais interagem com ambientes marinhos mais profundos e com o avanço da separação entre os continentes a crosta oceânica é criada entre eles, preenchendo gradualmente o espaço resultante em episódios vulcânicos sucessivos de adição de material basáltico (Figura 2).



FIGURA 2 - Modelo de uma massa continental e desenvolvimento de margens continentais passivas. Em (A) é mostrado a megassequência pré-rifte, (B) a megassequência sin-rifte, (C) a megassequência transicional e (D) a megassequência pós-rifte Fonte: Teixeira *et al.*, 2009 (Modificado pela Autora, 2018).

Fontana (1996) definiu 17 sequências deposicionais para a bacia (Figura 3), que podem ser agrupadas em megassequências definidas por Barboza *et al.* (2006).

A megassequência pré-rifte (138 Ma) é marcada por processos extensionais, onde há afinamento da litosfera, que antecede o rompimento da crosta continental. Corresponde a sedimentos e rochas vulcânicas do Paleozoico e Mesozoico da Bacia do Paraná (Formações Botucatu e Serra Geral). A megassequência sin-rifte de 127 - 118 Ma (Neocomiano-Barremiano) é caracterizada por falhamentos normais, definindo semi-grábens na plataforma continental, com a interpretação de que os falhamentos aumentam para leste (DIAS et. al., 1994). Segundo Bizzi et al. (2003) sua base assenta-se sobre rochas vulcânicas como basaltos tholeíticos representados pela Formação Imbituba, que são sobrepostas por conglomerados. folhelhos e fragmentos de basalto da Formação Cassino. Na megassequência transicional (113 Ma), identificada apenas na região da Plataforma de Florianópolis, a Formação Cassino é sobreposta pela Formação Curumim (rochas vulcânicas) e em seguida pela Formação Ariri, constituída por anidrita e espessas camadas de evaporitos que recobrem as camadas do pré-sal. A megassequência pós-rifte (Albiano (110 Ma) até o Recente), representa a sedimentação marinha da bacia, subdividida em:

 Sequência do Albiano, com sua porção superior coincidente com o topo da seção de calcários da Formação Porto Belo;

2) Sequência Albiano/Turoniano, composta pelos arenitos da Formação Tramandaí;

 Sequência do Cretáceo Superior (Cenomaniano/Turoniano), representada pela Formação Atlântida com sedimentos pelíticos, responsável pela deposição de areias na área do baixo de Mostardas e folhelhos na plataforma continental;

 Sequência do Coniaciano/Pleistoceno, representada pela Formação mais recente da bacia (Imbé) composta por sedimentos clásticos e por folhelhos.

Estas principais sequências deposicionais e as formações geológicas citadas são identificadas na carta estratigráfica da Bacia (Figura 4).



FIGURA 3 - Sequências deposicionais definidas para a Bacia de Pelotas, onde A representa a Fase Rifte; as sequências B a F representam a cunha de margem passiva da megassequência transgressiva (Aptiano-Paleoceno superior); as sequências G a Q mostram o desenvolvimento da cunha de margem passiva da megassequência regressiva (Paleoceno superior - Recente)

Fonte: Rosa *et al.*, 2006 apud Fontana (1996) e Barboza *et al.* (2006) (Modificado pela Autora, 2018).



FIGURA 4 - Carta Estratigráfica da Bacia de Pelotas Fonte: Bueno *et al.* 2007.

4.1 Cone do Rio Grande

O Cone do Rio Grande (Figura 5), localizado na margem continental do Rio Grande do Sul, na Bacia de Pelotas é caracterizado como uma espessa cunha sedimentar, onde as camadas foram depositadas a uma alta taxa de sedimentação, entre o Mioceno e o Recente, abrangendo do talude a elevação continental, com profundidades que variam de 100 a 3600 metros (Fontana, 1994).

Os sedimentos depositados, segundo o estudo de Martins (1984) com testemunhos de sondagem da região do Cone, indicam que estes são provenientes da drenagem das Terras Altas do Rio Grande do Sul com contribuição do Rio da Prata. Estudos apresentados pelo mesmo autor, em 2003, indicam que os sedimentos atuais provém da Lagoa dos Patos e Rio da Prata.

Segundo Fontana (1994), a rápida taxa de sedimentação e o rápido soterramento propiciaram a preservação de matéria orgânica e a formação de gás biogênico. Em 1996, o mesmo autor faz uma análise sismoestratigráfica da Bacia de Pelotas, dividindo a região que engloba o Cone do Rio Grande em 17 sequências deposicionais, além de identificar anomalias de amplitude que indicam camadas de hidratos de gás, destacando sua ocorrência em uma área que abrange cerca de 40.000 a 50.000 km² na direção NE-SW sob a lâmina d'água entre 500 a 3.500 m. Apresentando uma espessura média de 600 m, com a existência de gás livre abaixo da zona de estabilidade dos hidratos de gás (Figuras 6). Esta espessura média também foi confirmada por Freire (2013) (Figura 7).

A espessura da zona de estabilidade de hidratos de gás na margem continental é controlada pela pressão hidrostática e pelo gradiente em temperatura que existe dentro dos sedimentos. Com uma lâmina de água mais profunda, a temperatura de derretimento dos hidratos (ponto de fusão) fica mais alta, aumentando o volume do mesmo, e a espessura da camada de sedimentos que pode suportar a ocorrência de hidratos, fica mais extensa (CLENNELL, 2000). Clennell (2000) afirma ainda que o limite de profundidade para se encontrar hidratos é de no mínimo 500 m (Figura 8).

Segundo Rosa (2007), os hidratos referentes à Bacia de Pelotas estão situados sobre o Cone do Rio Grande, sob a influência da corrente de contorno

AAIW (*Antartic Intermediate Water*) que pode ser responsável por manter as temperaturas baixas, preservando assim as camadas de hidratos.

Hidratos de gás no Cone do Rio Grande também foram confirmados por levantamentos sísmicos no trabalho de Rosa (2007), López (2009), Barros (2009) e Contreras *et al.* (2010) através de refletores BSR (*Bottom Simulating Reflector*).



FIGURA 5 – Mapa de localização do Cone do Rio Grande, na Bacia de Pelotas Fonte: Rosa *et al.*, 2006.



FIGURA 6 – Anomalia de amplitude destacando a base da camada de gás na Bacia de Pelotas Fonte: Fontana, 1996.



FIGURA 7 – Ocorrências conhecidas (círculos amarelos) e inferidas através de BSRs (círculos vermelhos) de hidratos de gás e em (B) a espessura estimada da zona de estabilidade de hidratos (GHSZ) em metros

Fonte: Freire, 2013 (Modificado de Council of Canadian Academies, 2008).



FIGURA 8 – Limite de profundidade para encontrar hidratos de gás (500 m) Fonte: Clennell, 2000.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho consiste na aplicação de atributos sísmicos instantâneos nas seções de reflexão pós-*stack* da Bacia de Pelotas, por ferramentas disponíveis no pacote *Seismic Un*x* (COHEN & STOCKWELL, 2017).

5.1 Sísmica de Reflexão

A sísmica de reflexão é um método geofísico que utiliza a reflexão de ondas mecânicas para o estudo das propriedades das camadas em subsuperfície.

O levantamento sísmico de reflexão (Figura 9) é feito utilizando uma fonte sísmica artificial, de energia controlada como o *vibroseis*, *air-guns* ou explosivos. Após a fonte emitir o pulso, as ondas se propagam em subsuperfície e parte de sua energia é refletida quando encontra uma interface, permitindo a separação de camadas com diferentes impedâncias acústicas, sendo que a outra parte da energia é transmitida para as camadas inferiores.

As ondas refletidas chegam aos receptores (geofones ou hidrofones) em superfície e são registradas por um sismógrafo. O tempo de trânsito das ondas refletidas até chegarem aos receptores é dado pela equação a seguir:

$$t(x) = t_0^2 + \frac{x^2}{V^2} \tag{1}$$

Onde: t_0 = tempo *zero-offset*; x = afastamento fonte-receptor; V = velocidade;



FIGURA 9 – Levantamento sísmico marinho Fonte: Broker, 2014 (Modificado pela Autora, 2018)

5.1.1 Impedância Acústica

A impedância acústica, dada pela equação a seguir, caracteriza-se pela resistência da onda acústica em atravessar um meio.

$$Z = \rho v$$

(2)

Onde,

 ρ = densidade do meio;

v = velocidade da onda

Segundo Kearey *et al.* (2002) quanto mais rígida a rocha, mais alta é sua impedância acústica, ou seja, maior a resistência que a onda encontra ao atravessála. Intuitivamente, quanto menor o contraste em impedância acústica em uma interface, maior é a proporção da energia transmitida através da interface.

5.1.2 Refletividade (Coeficiente de Reflexão)

O coeficiente de reflexão *R* indica a quantidade de energia que será refletida numa interface separando dois meios com impedâncias acústicas diferentes, ou seja, é a porção de energia que retorna da interface e é calculado como a razão entre a amplitude A_1 do raio refletido e a amplitude A_0 do raio incidente Kearey *et al.* (2002):

$$R = \frac{A_1}{A_0} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$
(3)

Onde, ρ_1 , v_1 , Z_1 , ρ_2 , v_2 , Z_2 são os valores da densidade, da velocidade das ondas P e da impedância acústica nas primeira e segunda camadas, respectivamente. Dessa equação segue-se que -1 $\leq R \leq$ +1. Um valor negativo de R significa uma mudança de fase de π (180°) no raio refletido.

5.1.3 Traço Sísmico

A medida gravada em cada receptor, após o disparo de uma fonte sísmica, é uma representação do movimento do solo, em terra ou da variação da pressão, no mar, chamado de traço sísmico. O conjunto de um ou mais traços sísmicos é chamado de sismograma (Kearey *et al.*, 2002).

O traço sísmico pode ser representado como a convolução de um pulso de entrada gerado pela fonte com uma série temporal conhecida como função refletividade, composta de uma série de impulsos (Figura 10).



FIGURA 10 – Modelo Convolucional do traço sísmico Fonte: Kearey *et al.,* 2002.

A função refletividade é obtida através do conhecimento das velocidades e densidades das camadas geológicas e representa a porção de energia que retorna da interface. O modelo convolucional do traço sísmico é dado pela equação a seguir:

$$S(t) = R(t) * W(t) + r(t)$$
 (4)

Onde:

S(t) = Sinal sísmico; R(t) = Função Refletividade; W(t) = Fonte sísmica; r(t) = Ruído

A análise de traços complexos trata um traço sísmico f(t) como a parte real de um sinal analítico ou complexo. A parte imaginária denominada de quadratura ou conjugado pode ser determinada em termos da transformada de Hilbert a partir do traço real e vice-versa pela operação de convolução, como representado abaixo.

$$f * (t) = \frac{1}{\pi} \sum_{n = -\infty}^{+\infty} f(t - n\Delta t) \frac{(1 - e^{j\pi n})}{n}$$
(5)
e

$$f * (t) = \frac{2}{\pi} \sum_{n = -\infty}^{+\infty} f\left(-n\Delta t\right) \frac{\left[sen^2\left(\frac{\pi n}{2}\right)\right]}{n} \tag{6}$$

Com $n \neq 0$ e j indicando o vetor unitário imaginário

O conceito de traço sísmico complexo permite definir as informações de amplitude, fase e frequência instantânea (denominados de atributos) que são medidos na análise de traços complexos (TANER *et al.*, 1979).

Taner *et al.* (1979) define que o traço sísmico real, f(t) pode ser expresso em termos de uma amplitude dependente do tempo A(t) e uma fase $\theta(t)$.

$$f(t) = A(t) \cos \theta(t) \tag{7}$$

A parte imaginária do traço, ou quadratura f * (t), pode ser descrita pela equação:

$$f * (t) = A(t) \operatorname{sen} \theta (t)$$
(8)

Assim, o traço sísmico complexo F(t) é definido como:

$$F(t) = f(t) + jf * (t)$$
 (9)

Se f(t) e f * (t) são conhecidos, a amplitude A(t) chamada de "força de reflexão" e $\theta(t)$, chamado de fase instantânea, podem ser expressos por:

$$A(t) = [f^{2}(t) + f^{2}(t)]^{1/2} = |F(t)|$$
(10)

е

$$\theta(t) = tan^{-1} \left[\frac{f^{*}(t)}{f(t)} \right] \tag{11}$$

O traço sísmico complexo (Figura 11) consiste em uma parte real x (t), que é o traço sísmico registrado, e uma parte imaginária y (t), que é uma função
matemática calculada a partir da parte real pela transformada de Hilbert. Quando as partes real e imaginária são adicionadas em sentido vetorial, o resultado é uma espiral helicoidal centrada no eixo do tempo sísmico (*t*). Este traço helicoidal, que pode ser considerado um vetor é o traço sísmico complexo, que muda continuamente seu comprimento e rotação, sendo A(t) o módulo variável no tempo e $\theta(t)$ o argumento de variação de tempo deste vetor (ângulo com a horizontal).



FIGURA 11 – Representação de um traço sísmico complexo Fonte: Hardage B., 2010 (Modificado pela Autora, 2018).

5.2 Atributos Sísmicos Instantâneos

Os atributos de amplitude, também conhecidos por atributos instantâneos extraem informações referentes ao envelope, fase e frequência dos traços sísmicos e são calculados a partir do sinal analítico, gerado pela Transformada de Hilbert que desloca o traço real em de 90°.

Para o cálculo de atributos instantâneos do traço sísmico complexo foi utilizado o programa *suattributes* do pacote de programas *Seismic Un*x* (COHEN & STOCKWELL, 2017). Segundo Taner *et al.* (1979) cada atributo gerado possui uma função e, portanto, uma aplicação específica: o atributo envelope é sensível a

variações de impedância acústica e consequentemente a mudanças de litologia, porosidade, presença de hidrocarbonetos e de afinamento de camadas; a fase instantânea é útil para rastrear a continuidade dos refletores e, portanto, para detectar discordâncias, falhas e variações laterais na estratigrafia; e o atributo de frequência instantânea é útil na identificação de atenuação anômala do sinal e afinamento de camadas.

A Figura 10 mostra um exemplo do traço sísmico real (a) e sua quadratura (b), com as linhas pontilhadas representando a "intensidade de reflexão" A(t), também chamada de envelope, a fase $\theta(t)$ (c) e a frequência instantânea (d). Os traços reais e sua quadratura são dados pela projeção do traço do vetor de rotação nos planos real e imaginário, como mostrado Figura 11. Nas Figuras 12a e 12b, tanto o traço real como a quadratura são idênticos, exceto pelo deslocamento de fase em 90°. Sem essa mudança de fase, seriam observadas as mesmas características, como a mesma coerência e a mesma relação sinal-ruído nas seções sísmicas reais e em quadratura.



FIGURA 12 – Diagrama da parte real (a), e em quadratura (b) de um traço sísmico. Também é mostrado o envelope (curva pontilhada em (a e b)), fase (c) e a frequência instantânea (d) com a frequência média ponderada (linha pontilhada) Fonte: Taner *et. al.*, 1979 (Modificado pela Autora, 2018).

5.2.1 Envelope ("Intensidade de Reflexão")

O atributo envelope, também chamado de "força de reflexão" ou amplitude do envelope, é definido como a energia total do traço sísmico, sendo representado pela Equação 10 (tópico 5.1.3), onde A(t)é o envelope; f(t) é o traço sísmico real e f * (t) a quadratura do traço sísmico. O valor de A(t) é sempre igual ou maior que 0.

Segundo Taner *et al.* (1979) a "intensidade da reflexão" independe da fase e pode ter seu máximo em pontos de fase que não sejam picos ou vales do traço real, especialmente quando um evento é composto de várias reflexões. Assim, a força máxima de reflexão associada a um evento de reflexão pode ser diferente da amplitude do maior pico ou vale de traço real.

Segundo este autor, o valor máximo da reflexão é geralmente associada a grandes mudanças litológicas entre camadas rochosas adjacentes, como discordâncias e limites associados a mudanças bruscas no nível do mar ou em ambientes deposicionais, sendo também associada a acumulações de gás. A medida da força de reflexão pode auxiliar na identificação litológica de leitos de *subcrop* (parte de uma formação geológica que está próxima da superfície, mas não é aflorante), que alteram a interferência das reflexões, ou ainda indicar falhas e acumulações de hidrocarbonetos. As acumulações de hidrocarbonetos, principalmente o gás, podem aparecer como anomalias de alta amplitude, chamados de *bright spots*.

5.2.2 Fase Instantânea

O atributo de fase instantânea tem como finalidade rastrear a continuidade dos refletores, sendo eficaz ao destacar descontinuidades, falhas, armadilhas estratigráficas como *pinch-outs*, angularidades e interfaces de leito. Limites de sequência sísmica, padrões de camada sedimentar e regiões de padrões *onlap/offlap* frequentemente são exibidos com clareza.

Segundo Taner *et. al.*, (1979), a fase instantânea $\theta(t)$ definida pela Equação 11 (tópico 5.1.3), enfatiza a continuidade dos eventos. $\theta(t)$ representa o ângulo entre

as partes imaginária e real do traço analítico quando plotado em coordenadas polares, sendo expresso em graus, geralmente de –180° (vale) até 0° (pico) até + 180° (vale).

5.2.3 Frequência Instantânea

O atributo de frequência instantânea é uma medida da frequência média dependente do tempo e é independente da fase e da amplitude, sendo calculado como a taxa de mudança da fase instantânea, dado pela equação a seguir:

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \left\{ tan^{-1} \left[\frac{f * (t)}{f(t)} \right] \right\}$$
(12)

Que resulta em:

$$\omega(t) = \frac{f(t)\frac{df*(t)}{dt} - f*(t)\frac{df(t)}{dt}}{f^2(t) + f*^2(t)}$$
(13)

Onde:

 $\omega(t)$ = Frequência instantânea;

f(t) = Traço sísmico real;

f * (t) = Quadratura do traço sísmico

A maioria dos eventos de reflexão é composta de reflexões individuais de um número de refletores espaçados que permanecem quase constantes no contraste de impedância acústica. Segundo Taner *et al.* (1979), a superposição de reflexões individuais pode produzir um padrão de frequência que caracteriza a reflexão composta. O caráter de uma reflexão composta mudará gradualmente à medida que a sequência de camadas mudar gradualmente em espessura ou litologia. Variações, como em *pinch-outs* e nas bordas das interfaces hidrocarboneto-água, tendem a alterar a frequência instantânea mais rapidamente. A Interferência destrutiva

causada por artefatos de processamento sísmico, como correções incorretas de NMO também pode reduzir artificialmente o conteúdo de frequência.

Uma mudança para frequências mais baixas ("sombras de baixa frequência") é frequentemente observada em refletores abaixo de *sand gas* e reservatórios de óleo, os quais atenuam as altas frequências (YILMAZ O., 2001). *Sand gas* são acumulações de gás que ocorrem em uma variedade de configurações geológicas onde o gás migra de uma fonte de rocha para uma formação de arenito, mas é limitado em sua capacidade de migrar para cima devido à permeabilidade reduzida da rocha. Segundo Taner *et al.* (1979) zonas de fratura em rochas frágeis são às vezes associadas também com sombras de baixa frequência.

A Figura 13 representa a comparação entre os atributos instantâneos discutidos acima, aplicado a um dado sísmico real.



FIGURA 13 - Dado sísmico real (a) contendo um *bright spot* e a aplicação dos atributos de (b) Envelope, (c) Fase Instantânea e (d) Frequência Instantânea Fonte: Yilmaz O., 2001 (Modificado pela Autora, 2018).

5.3 Migração

Segundo Yilmaz (2001) a migração tem como finalidade reposicionar os refletores, em tempo ou profundidade, para suas verdadeiras posições em subsuperfície, já que estes podem ser deslocados por estruturas como falhas e fraturas. A migração colapsa difrações, aumentando assim a resolução espacial, produzindo uma imagem sísmica do subsolo.

Esta etapa do processamento sísmico pode ser feito antes do empilhamento (pré-*stack*) ou após (pós-*stack*). Neste trabalho será realizada a migração pós-stack para profundidade através de ferramentas disponíveis no pacote *Seismic Un*x* (COHEN & STOCKWELL, 2017). A migração em profundidade diferentemente da

migração em tempo que utiliza a velocidade RMS (velocidade do pacote), utiliza os valores de velocidade intervalar (velocidade de cada camada), ou seja, a velocidade RMS suavizada pela Fórmula de Dix:

$$V_{i} = \sqrt{\frac{\left[\left(V_{RMS,n}\right)^{2} t_{n} - \left(V_{RMS,n-1}\right)^{2} t_{n-1}\right]}{t_{n} - t_{n-1}}}$$
(14)

Onde:

 $V_{RMS,n}$ = Velocidade RMS da camada n; t_n = tempo zero-*offset* da camada n

6 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Foram disponibilizadas pelo Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) da Agência Nacional do Petróleo (ANP), 10 seções sísmicas de reflexão pós-*stack* (no formato **.sgy*) da porção *offshore* da Bacia de Pelotas, dispostas sobre a região do Cone do Rio Grande.

As etapas do processamento consistiram na transformação dos dados do formato SEG-Y para o formato SU, aplicação dos Atributos Instantâneos, rastreamento de horizontes e estruturas, correlação entre os horizontes das seções, interpretação, geração de um modelo de velocidades e migração para profundidade (Figura 14).



FIGURA 14 – Fluxograma de Processamento Fonte: Autora, 2018.

6.1 Conversão dos Dados

A primeira etapa do processamento no ambiente *Linux* consistiu em transformar os dados do formato SEG-Y (**.sgy*) para o formato **.su*, para que eles pudessem ser manipulados no *software Seismic Un*x* (COHEN & STOCKWELL, 2017), que funciona através de linhas de comando.

Para a transformação dos dados, utilizou-se o seguinte comando:

segyread tape=nome_da_linha.sgy | segyclean > nome_da_linha.su

Onde, *segyread* é o comando utilizado para ler o arquivo no formato SEG-Y e *segyclean* o pacote que zera os valores dos campos de cabeçalho opcionais, para que não entrem em conflito com os pacotes gráficos do *Seismic Un*x* (SU).

As seções originais (enviadas pela ANP) paralelas à costa, J99B137 e J99B187 apresentaram geometrias descrescentes na parte mais rasa da bacia, ou seja, mais próximo da plataforma continental. O mesmo acontece com as linhas originais perpendiculares, J99B194 e J00B222. Isto ocorre devido à maneira como foram feitas estas aquisições, ou seja, da parte mais profunda da bacia em direção à plataforma, no sentido NE-SW e SE-NW, para as linhas paralelas e perpendiculares, respectivamente.

A direção das seções para SW-NE (paralelas) e NW-SE (perperdiculares), foram padronizadas no *Seismic Un*x*. Os comandos abaixo exemplificam este processamento para a linha J99B194:

surange < J99B194.su

sushw < J99B194.su key=tracr a=13531 b=-1 > temp1

susort < temp1 tracr > J99B194_inv.su

Com comando *surange*, que acessa o cabeçalho do dado, é possível obter o número de traços do dado (13531 traços na linha J99B194). Em seguida, deve-se editar o parâmetro *tracr* do cabeçalho com o comando *sushw*, acrescentando um valor de incremento -1. Por fim, utiliza-se o *susort* para organizar o dado de acordo com a variável *tracr*.

6.2 Aplicação dos Atributos Instantâneos

Com os dados no formato *.*su*, foi possível fazer a aplicação dos atributos instantâneos nas seções sísmicas, utilizando o pacote *suattribut*es. Utilizou-se ainda o pacote *sugain* com o parâmetro *agc*=1, que aplica ganho na seção sísmica.

O comando abaixo exemplifica a aplicação do atributo Envelope, também conhecido como Amplitude:

suattributes < nome_da_linha.su mode=amp | sugain agc=1 > nome_da_linha_amp.su

Os parâmetros utilizados no pacote foram *mode=amp*, *mode=phase* e *mode=freq*, para a aplicação dos atributos de Envelope, Fase Instantânea e Frequência Instantânea, respectivamente. A fim de evitar a repetição dos comandos no terminal criou-se um script em linguagem *Shell* contendo o pacote *suattributes* e por questões estéticas os pacotes do *software* GMT (*Generic Mapping Tools*. WESSEL, P. & SMITH W. H. F., 2018) para a conversão dos dados **.su* para **.sgy* novamente, para que as imagens pudessem ser geradas (Apêndice A).

6.3 Rastreamento dos horizontes

Após a aplicação dos atributos, o rastreamento (*tracking*) dos horizontes e estruturas geológicas foram realizados na versão livre do *software Opendtect 6.2.0* (*dGB EARTH SCIENCES*, 2018).

A primeira etapa consistiu em criar um novo projeto (*Survey*) para cada linha e em seguida selecionar o dado **.sgy* original que se desejava utilizar (Figura 15). Feito isso, uma janela de configuração do levantamento é aberta, mostrando alguns parâmetros da linha sísmica que podem ser editados manualmente. Como as informações são provenientes do cabeçalho SEG-Y da linha, não houve necessidade de edição. Em seguida, é necessário importar este arquivo **.sgy* no projeto (Figura 16), desta forma a *Survey* é criada.

Para carregar a linha sísmica deve-se selecionar a opção 2D line > add > nome da linha. Na seta azul ao lado, é possível importar os outros arquivos *.sgy da mesma linha com os atributos já aplicados. Para realizar o *tracking* utiliza-se a opção *FaultStickSet > add*, para falhas (Figura 17) e 2D *Horizon > Track New* para os horizontes.

Create New Survey	_ _ ×
Specify new survey parameters	
Survey name Linha J00B166A	
Available data 🗹 3D 🛛 🗹 2D	
Initial setup Scan SEG-Y file(s) Set for 2D only Copy from other survey T Read from Survey Setup file Enter by hand	
Z Domain 🖲 Time 💿 Depth	
Next 🛛 😒 Canc	el 🕜 Help

FIGURA 15 – Janela de criação de um novo projeto *(Survey)* Fonte: Autora, 2018 *(Opendtect* 6.2.0).

😸 Edit Survey Parameters		x
Survey name	Linha J00B166A	
Location on disk	C:\Users\Laura	
Survey type	Both 2D and 3D 🔹	
Ranges/coordinate settings	Enter below	
Survey ranges: In-line Range	10000 🗼 12189 🌧 Step 1 🚔	
Cross-line range	10000 🔺 12129 🔺 Step 1 🔺	
Z range	0 17000 Step 4 millisecond -	
Display depths in	● meter ◎ feet	
Seismic Reference Datum (m)	0	
Coordinate settings:	Easy Advanced Define Coordinate System	n
First In-line/Cross-line	10000 10000 - (X,Y) 547535 6251277	
Another position on above In-line	10000 12129 = (X,Y) 653985 6251277	
Position not on above In-line	12189 12129 = (X,Y) 653985 6360727	
	▼ Apply	
	OK 🛛 🐼 Cancel 👔 He	əlp
Free space on disk: 150.91 GB		

FIGURA 16 – Janela de configuração do levantamento Fonte: Autora, 2018 (*Opendtect* 6.2.0).



FIGURA 17 – Janela da *Survey* indicando onde carregar os dados (marcação em preto) e rastrear falhas (marcação em vermelho) Fonte: Autora, 2018 (*Opendtect* 6.2.0).

6.4 Migração para profundidade

Para realizar a migração de tempo para profundidade é necessário um modelo de velocidades. Este modelo foi feito através dos dados exportados do *software Opendtect* 6.2.0 em *.*dat*, provenientes do rastreamento (*tracking*) dos refletores interpretados como sendo o fundo do mar e embasamento. Desta forma, foram definindas 2 interfaces e 3 camadas (a do fundo do mar, pacote sedimentar e embasamento). Este processamento foi realizado através de um script em linguagem S*hell* e pacotes do *Seismic Un*x* (Apêndice B), o qual gerou o modelo de velocidade em tempo e profundidade para cada linha, fornecendo a seção migrada

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Análise e Interpretação dos resultados dos Atributos Instântaneos

Com a aplicação dos atributos instantâneos foi possível observar uma melhora no imageamento das seções, tornando mais nítidos refletores e estruturas como falhas, que não estavam muito claras nos dados originais (Figuras 18 a 27).

As Figuras de 28 a 37 representam as seções originais com ganho nos traços, os atributos de envelope, fase e frequência instantâneas, aplicados em conjunto com o *sugain*, além das linhas que cruzam cada seção (linhas vermelhas). As linhas nestas figuras já estão padronizadas, sendo a J99B137, J99B187, 0231-0488, J00B291 e J00B351 com direção SW - NE (paralelas à costa), enquanto que as linhas J00B166A, J99B194, J00B222 e J00B258 são perpendiculares à costa, com direção NW – SE.



FIGURA 18 – Seção sísmica original J99B137 com direção NE-SW (aquisição realizada da parte mais profunda da bacia em direção à plataforma) Fonte: Dado cedidos pela Agência Nacional do Petróleo, 2018. J99B187 (Dado Original)



FIGURA 19 – Seção sísmica original J99B187 com direção NE-SW (aquisição realizada da parte mais profunda da bacia em direção à plataforma) Fonte: Dado cedidos pela Agência Nacional do Petróleo, 2018.



FIGURA 20 – Seção sísmica original 0231-0488 (SW-NE) Fonte: Dados cedidos pela Agência Nacional do Petróleo, 2018.



FIGURA 21 – Seção sísmica original J00B291 (SW-NE) Fonte: Dado cedidos pela Agência Nacional do Petróleo, 2018.



FIGURA 22 – Seção sísmica original J00B351 (SW-NE) Fonte: Dado cedidos pela Agência Nacional do Petróleo, 2018.

J00B166A (Dado Original)





FIGURA 23 – Seção sísmica original J00B166A (NW-SE) Fonte: Dado cedidos pela Agência Nacional do Petróleo, 2018.



FIGURA 24 – Seção sísmica original J99B194 com direção SE-NW (aquisição realizada da parte mais profunda da bacia em direção à plataforma) Fonte: Dado cedidos pela Agência Nacional do Petróleo, 2018.



FIGURA 25 – Seção sísmica original J00B222 com direção SE-NW (aquisição realizada da parte mais profunda da bacia em direção à plataforma) Fonte: Dado cedidos pela Agência Nacional do Petróleo, 2018.



FIGURA 26 – Seção sísmica original J99B258 (NW-SE) Fonte: Dado cedidos pela Agência Nacional do Petróleo, 2018.



FIGURA 27 – Seção sísmica original J00B336 (NW-SE) Fonte: Dado cedidos pela Agência Nacional do Petróleo, 2018.



FIGURA 28 – Seção sísmica J99B137 com a aplicação do ganho (a) e os atributos de envelope (b), fase (c) e frequência instantânea (d) aplicados. As linhas verticais em vermelho indicam as seções sísmicas que cruzam esta Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 29 – Seção sísmica J99B187 com a aplicação do ganho (a) e os atributos de envelope (b), fase (c) e frequência instantânea (d) aplicados. As linhas verticais em vermelho indicam as seções sísmicas que cruzam esta Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 30 – Seção sísmica 0231-0488 com a aplicação do ganho (a) e os atributos de envelope (b), fase (c) e frequência instantânea (d) aplicados. As linhas verticais em vermelho indicam as seções sísmicas que cruzam esta Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 31 – Seção sísmica J00B291 com a aplicação do ganho (a) e os atributos de envelope (b), fase (c) e frequência instantânea (d) aplicados. As linhas verticais em vermelho indicam as seções sísmicas que cruzam esta Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 32 – Seção sísmica J00B351 com a aplicação do ganho (a) e os atributos de envelope (b), fase (c) e frequência instantânea (d) aplicados. As linhas verticais em vermelho indicam as seções sísmicas que cruzam esta Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 33 – Seção sísmica J00B166A com a aplicação do ganho (a) e os atributos de envelope (b), fase (c) e frequência instantânea (d) aplicados. As linhas verticais em vermelho indicam as seções sísmicas que cruzam esta Fonte: Autora, 2018



Nº de traços

FIGURA 34 – Seção sísmica J99B194 com a aplicação do ganho (a) e os atributos de envelope (b), fase (c) e frequência instantânea (d) aplicados. As linhas verticais em vermelho indicam as seções sísmicas que cruzam esta Fonte: Autora, 2018.



Nº de traços

FIGURA 35 – Seção sísmica J00B222 com a aplicação do ganho (a) e os atributos de envelope (b), fase (c) e frequência instantânea (d) aplicados. As linhas verticais em vermelho indicam as seções sísmicas que cruzam esta Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 36 – Seção sísmica J99B258 com a aplicação do ganho (a) e os atributos de envelope (b), fase (c) e frequência instantânea (d) aplicados. As linhas verticais em vermelho indicam as seções sísmicas que cruzam esta Fonte: Autora, 2018.



Nº de traços

FIGURA 37 – Seção sísmica J00B336 com a aplicação do ganho (a) e os atributos de envelope (b), fase (c) e frequência instantânea (d) aplicados. As linhas verticais em vermelho indicam as seções sísmicas que cruzam esta Fonte: Autora, 2018.

A aplicação do atributo de Envelope conseguiu realçar refletores com forte amplitude, como aqueles correspondentes ao embasamento e ao fundo mar, em todas as seções. Este atributo ainda destaca um refletor abaixo ao do fundo do mar e paralelo a este, com alta amplitude e polaridade negativa. Acima dele observa-se uma zona com redução da amplitude dos refletores. Esta característica pôde ser observada facilmente nas seções J00B222 (entre 1 a 4,5 segundos); J00B291 (em 2,5 segundos); J99B187 (entre 0,5 a 3 segundos); J99B194 (~ 0,7 a 4,5 segundos); J99B258 (entre ~ 1,3 a 3,5 segundos) e principalmente na seção 0231-0488 (entre ~ 2,3 a ~3,3 segundos) , na qual a zona de redução de amplitude dos refletores é bem visível.

Segundo os trabalhos de Clennell (2000); Rosa (2007) e Freire (2013), refletores com as características citadas acima podem ser identificados como refletores BSR (*Bottom Simulating Reflector*). Segundo Freire (2013), o BSR é um refletor que indica o início da zona de estabilidade dos hidratos (*gas hydrate stability zone –* GHSZ), gerando um efeito de redução das amplitudes dos refletores, o *blanking,* e cortando os estratos sedimentares de forma paralela ao fundo do mar, sendo assim formada por processos posteriores à deposição dos sedimentos (FREIRE, 2013 *apud* BERNDT *et al.,* 2004).

A principal característica do BSR é a polaridade negativa do refletor em relação ao refletor do fundo do mar e alta amplitude, gerada pelo contraste de impedância acústica entre uma zona com hidratos mais densa e com maior velocidade, acima, e uma zona com gás livre, menos densa e com baixa velocidade, abaixo (Figura 38).

O processo de escape de fluidos, o qual pode ser água, gás ou óleo, geram feições chamadas de *seepages* nas seções sísmicas, através do aumento na pressão desses fluidos junto aos sedimentos ou através de zonas de falhas, gerando também na superfície oceânica uma cratera (*pockmark*). Esta cratera é identificada em seções sísmicas como uma feição em "V", que ocorre quando estruturas de escape de gás (*seepages*) alcançam o fundo oceânico (Figuras 39 e 40) (ROSA *et al,* 2006 apud HOVLAND & JUDD, 1988). O gás dentro dos sedimentos reduz a velocidade das ondas P até o refletor romper (ROSA, 2013), gerando estas feições, além de estruturas dômicas (Figura 41).

Visto que foi inferida a presença de hidratos de gás na região do Cone do Rio Grande em diversos trabalhos, como em Fontana (1996) e Freire (2013) (Figura 42), as anomalias de amplitude identificadas nas seções deste trabalho foram caracterizadas como possíveis refletores BSR, relacionados com escape de gás, *pockmarks* e estruturas dômicas (Figura 43).



FIGURA 38 – Seção sísmica mostrando um Refletor BSR típico, e o efeito de redução de amplitudes de refletores dentro da zona de estabilidade de hidratos de gás, o *blanking*. Localidade: Blake Outer Ridge, na margem passiva do SE dos EUA Fonte: Clennell, 2000.



FIGURA 39 - Seção sísmica mostrando o BSR proeminente e diversas estruturas de escape de gás biogênico que terminam em *Pockmark* Fonte: Rosa, 2007 *apud* Ludmann & Wong, 2003.



FIGURA 40 - Seção sísmica da Bacia de Pelotas com três *seepages* associados a uma zona de escorregamento Fonte: Rosa *et al.*, 2006.



FIGURA 41 - Seção sísmica mostrando o escape de gás formando uma estrutura dômica Fonte: Rosa, 2007 *apud* Ludmann & Wong, 2003.



FIGURA 42 – Linha sísmica da Bacia de Pelotas, mostrando o BSR cortando os estratos sedimentares. Notar a polaridade negativa da BSR (inversa ao fundo do mar) e as anomalias de velocidade acima e abaixo da mesma. Dado sísmico proprietário da Petrobras. Cortesia de Emanuel Fonseca da Costa e Sérgio Goulart Oreiro Fonte: Freire, 2013.



FIGURA 43 – Seção sísmica J99B258 (A) identificando possíveis escapes de gás e refletor BSR, obtidos através do *sugain*. Regiões com ausência ou poucos refletores não são favorecidas no ganho, sendo facilmente observadas (escape de gás). Em (B), a seção 0231-0488 com o atributo de Envelope ressaltando regiões com amplitude baixa (*blanking*), onde se localiza a zona de estabilidade dos hidratos de gás (GHSZ) e os escapes de gás Fonte: Autora, 2018.

O atributo de Fase instantânea contribuiu no *tracking* dos horizontes, visto que dá continuidade aos refletores, assim o embasamento e o BSR puderam ser definidos com mais precisão em algumas seções.

A Fase aliada ao Envelope ajudou também a definir os refletores falhados e consequentemente a contribuir no mapeamento das falhas, além de facilitar a visualização das terminações de refletores, estruturas dômicas (Figura 44), que puderam ser identificadas nas seções J99B258, J00166A, J99B194 e J00B222 e *pockmarks* (Figura 45), identificados identificadas nas seções J99B258, 0231-0488, J99B187 e J00B291.



FIGURA 44 – Estruturas dômicas e falhas (em amarelo), observada nas seções J00B222 através do atributo Envelope (A) e na seção J99B258 pelo atributo de Fase (B) e Envelope (C) Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 45 – Seção sísmica 0231-0488 (A) mostrando refletores falhados, *pockmark* e o BSR, obtidos através do atributo de Envelope e em (B) *pockmarks* obtidos pelo atributo de Fase instantânea na seção J99B187 Fonte: Autora, 2018.

O atributo de Frequência instantânea dividiu as seções em intervalos de frequência mais fortes e mais fracos, desta forma refletores com frequências diferentes do pacote sedimentar, como aqueles correspondentes ao embasamento, puderam ser identificados (zona avermelhada na Figura 46). Nota-se também nas
seções, como na J00B258 e J00B222 que o atributo ressaltou uma possível mudança na litologia ou espessura das camadas, destacando áreas avermelhadas e amareladas, as quais possuem diferentes frequências.

As seções com suspeita de escapes de gás apresentaram nessa região, zonas de sombras de frequência mais baixas (tonalidade amarelada) em relação ao pacote sedimentar. Nota-se ainda, que nas regiões de zona de sombra, os refletores são invisíveis e ou estão falhados (como o refletor do embasamento). Segundo Yilmaz (2001) uma mudança para frequências mais baixas ("sombras de baixa frequência") é frequentemente observada em sinais de refletores abaixo de *sand gas* e reservatórios de óleo, que atenuam as altas frequências (ver seção 5.2.3). Esta afirmação corrobora a ideia de que pode haver gás nessa região do Cone do Rio Grande.

Os refletores BSR não puderam ser precisamente identificados nas seções com este atributo, assim como as falhas. As regiões em que se encontra o BSR apresentam tonalidade de cor e, portanto frequências, semelhantes àquelas observadas nas zonas de escapes.



FIGURA 46 – Seção sísmica J00B258 em escalas de cores diferentes, realçando a região onde se localiza o BSR, as mudanças de frequência e o refletor do embasamento, falhado nas zonas de sombras Fonte: Autora, 2018.

7.2 Rastreamento dos horizontes e falhas

A aplicação dos atributos contribuiu na melhora dos refletores e estruturas das seções, desta forma o rastreamento (*tracking*) pôde ser feito. Os horizontes aqui rastreados não tiveram o intuito de serem interpretados, apenas de mostrar como os atributos sísmicos melhoraram o imageamento. A interpretação não pode ser realizada devido à falta de dados no perfil sônico do único poço (1-BRSA-61-RSS) próximo às linhas sísmicas, o qual seria utilizado para a amarração, a fim de atribuir a informação geológica aos dados sísmicos.

Todos os atributos foram utilizados em conjunto, para que os horizontes e falhas fossem precisamente rastreados. As Figuras de 47 a 51 mostram o *tracking* acima de algumas seções, as quais tiveram o atributo de envelope aplicado, sendo este o que melhor ressaltou os horizontes e falhas.



FIGURA 47 – Seção sísmica 0231-0488 com os horizontes rastreados, sendo o primeiro refletor (em azul) correspondente ao fundo do mar e o segundo (em laranja) ao BSR. As marcações em amarelo correspondem às falhas Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 48 – Seção sísmica J00B291 com os horizontes rastreados, sendo o primeiro refletor (em azul) correspondente ao fundo do mar, o segundo (em laranja) ao BSR e o último (em vermelho) correspondente ao embasamento. As marcações em amarelo correspondem às falhas Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 49 – Seção sísmica J00B351 com os horizontes rastreados, sendo o primeiro refletor (em azul) correspondente ao fundo do mar, o segundo (em laranja) ao BSR e o último (em vermelho) correspondente ao embasamento. As marcações em amarelo correspondem às falhas

Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 50 – Seção sísmica J00B166A com os horizontes rastreados, sendo o primeiro refletor (em azul) correspondente ao fundo do mar, o segundo (em laranja) ao BSR e o penúltimo (em azul claro) correspondente ao embasamento. As marcações em amarelo correspondem às falhas Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 51 - Seção sísmica J99B258 com os horizontes rastreados, sendo o primeiro refletor (em azul) correspondente ao fundo do mar, o segundo (em laranja) ao BSR e o último (em vermelho) correspondente ao embasamento. As marcações em amarelo correspondem às falhas Fonte: Autora, 2018.

7.3 Correlação entre os horizontes

Visto que a maioria das seções se correlaciona entre si, estas foram carregadas no software Opendtect 6.2.0 (dGB EARTH SCIENCES, 2018), onde foi possível correlacionar os refletores. A correlação, mostrada nas Figuras de 52 a 59, contribuiu na definição do BSR em seções nas quais este refletor não estava aparente. Assim, foi possível definir o Bottom Simulating Reflector (BSR), além dos refletores do embasamento, nas 10 seções sísmicas.



FIGURA 52 – Correlação entre os refletores das linhas J99B137 e J99B194, destacando (em laranja) o BSR e o embasamento (em verde) Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 53 – Correlação entre os refletores das linhas J99B137 e J00B166A, destacando o embasamento (em verde) Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 54 – Correlação entre os refletores da linha J00B166A com a J99B137 e 0231-0488, destacando (em laranja) o BSR e o embasamento (em verde) Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 55 – Correlação entre os refletores da linha J00B166A com a J99B137 e J99B187, destacando (em laranja) o BSR e o embasamento (em verde) Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 56 – Correlação entre os refletores, em diferentes ângulos de visão, das linhas J99B137, J00B166A, 0231-0488 e J99B137, destacando (em laranja) o BSR e o embasamento das linhas (em verde) Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 57 – Correlação entre os refletores das linhas J00B351, J99B194, 0231-0488, J99B187 e J99B137, destacando (em laranja) o BSR e o embasamento (em verde) Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 58 – Correlação entre os refletores das linhas J00B291, J00B351, J00B166A, J99B194, J00B222, J00B291 e J00B336 Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 59 – Correlação entre os refletores das 10 seções (destaque para o BSR, em laranja) Fonte: Autora, 2018.

7.4 Migração para profundidade

As Figuras 60 e 61 mostram um exemplo do modelo de velocidades gerado para a linha J00B166A. Observa-se nos modelos 2 interfaces e 3 camadas, correspondentes à água (em azul), com velocidade de 1490 m/s, ao pacote sedimentar (em verde) com velocidade de 3245 m/s e o embasamento (em vermelho), com 5000 m/s.



FIGURA 60 – Modelo de Velocidades da linha J00B166A (NW-SE), em tempo, sendo a cor azul correspondente à água, verde correspondente ao pacote sedimentar e vermelho ao embasamento

Fonte: Autora, 2018.



FIGURA 61 – Modelo de Velocidades da linha J00B166A (NW-SE), em profundidade Fonte: Autora, 2018.

Na imagem a seguir (Figura 62) pode-se observar que os refletores BSR aparecem nas seções sísmicas em profundidades entre 500 a 3000 metros e ocorrem em locais onde a lâmina d'água atinge entre 2000 a 3000 metros de profundidade, confirmando, portanto o intervalo proposto por Fontana (1996) para que esses refletores ocorram (ver seção 4.1).



FIGURA 62 – Seções sísmicas com o atributo Envelope indicando o refletor BS*R (linha tracejada em laranja) Fonte: Autora, 2018.

As Figuras de 63 a 72 apresentam as seções sísmicas migradas para profundidade, com os dados originais e os atributos instantâneos aplicados. Observa-se que o embasamento inferido da bacia atinge em profundidade: 5.500 m (J99B137); 6.000 m (J99B187); a linha 0231-0488 não imagea o embasamento; 6.400 m (J00B291); 6.500 m (J00B351); 5.300 m (J00B166A); 4.600 m (J99B194); 4.200 m (J00B222); 4.900 m (J99B258) e 6.100 m (J00B336).





FIGURA 63 – Seção sísmica J99B137 (SW-NE) migrada para profundidade Fonte: Autora, 2018.







Nº de traços





FIGURA 64 – Seção sísmica J99B187 (SW-NE) migrada para profundidade Fonte: Autora, 2018.



0231-0488 - envelope

Nº de traços

500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000 4500 5000 5500 6000 6500 7000 7500 8000 8500 9000



0231-0488 - fase

Nº de traços

500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000 4500 5000 5500 6000 6500 7000 7500 8000 8500 9000





FIGURA 65 – Seção sísmica 0231-0488 (SW-NE) migrada para profundidade Fonte: Autora, 2018.





FIGURA 66 – Seção sísmica J00B291 (SW-NE) migrada para profundidade Fonte: Autora, 2018.



J00B351 - original

J00B351 - envelope



J00B351 - fase





FIGURA 67 – Seção sísmica J00B351 (SW-NE) migrada para profundidade Fonte: Autora, 2018.





FIGURA 68 – Seção sísmica J00B166A (NW-SE) migrada para profundidade Fonte: Autora, 2018.



J99B194 - original



Nº de traços



FIGURA 69 – Seção sísmica J99B194 (NW-SE) migrada para profundidade Fonte: Autora, 2018.



J00B222 - envelope



J00B222 - fase

Nº de traços



1000 2000 3000 4000 5000 6000 7000 8000 9000 10000 11000 12000 13000 14000



FIGURA 70 – Seção sísmica J00B222 (NW-SE) migrada para profundidade Fonte: Autora, 2018.



J99B258 - original

J99B258 - envelope



J99B258 - fase





FIGURA 71 – Seção sísmica J99B258 (NW-SE) migrada para profundidade Fonte: Autora, 2018.



J00B336 - fase Nº de traços 500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000 4500 5000 5500 6000 6500 7000 7500 8000 8500 9000



J00B336 - envelope Nº de traços 500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000 4500 5000 5500 6000 6500 7000 7500 8000 8500 9000





FIGURA 72 – Seção sísmica J00B336 (NW-SE) migrada para profundidade Fonte: Autora, 2018.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da aplicação dos atributos sísmicos instantâneos, foi possível melhorar o imageamento, realçando os refletores das seções, que contribuiram na definição de estruturas geológicas, as quais não estavam visíveis nos dados originais.

Os atributos instantâneos utilizados em conjunto, foram muito eficazes na definição de estruturas geológicas como falhas, presentes em todas as seções; *pockmarks*, os quais foram identificados nas direções NW-SE e SW-NE; estruturas dômicas, que ocorrem preferencialmente na direção NW-SE, além de zonas de *blanking*, que ocorrem em conjunto com os refletores BSR, visível em todas as seções.

O atributo de envelope foi o que melhor realçou refletores com forte amplitude, como aqueles correspondentes ao embasamento e fundo mar, além do refletor BSR, o qual foi identificado nas dez seções entre 500 a 3.000 metros de profundidade, indicando a base da camada dos hidratos de gás.

O atributo de fase instantânea em conjunto com o envelope, também contribuiu na identificação do BSR e das falhas, dando continuidade aos refletores. Já a frequência instantânea conseguiu destacar principalmente estruturas de escapes de gás, apresentando nessas regiões uma diminuição da frequência.

A correlação entre as linhas sísmicas contribuiu na definição de refletores, como o do embasamento da bacia e principalmente o BSR, em seções em que estes não estavam aparentes ou que causavam certa incerteza em relação à sua posição. Com a migração para profundidade, foi possível ainda conhecer as profundidades em que estes refletores se encontravam.

A interpretação das seções feitas a partir da análise dos atributos aplicados, aliada a trabalhos anteriores citados na área de estudo, como o de Sad *et al.* (1997) que reporta na Bacia de Pelotas a ocorrência de enormes acumulações de hidratos de gás, indica através de evidências sísmicas alta probabilidade de haver hidratos de gás nessa região do Cone do Rio Grande. Desta forma os atributos sísmicos se mostram essenciais na indústria petrolífera, pois diminuem o risco e direcionam a exploração.

ABREU, V. S. Geologic Evolution of Conjugate Volcanic Passive Margins: Pelotas Basin (Brazil) and Offshore Namibia (Africa): Implication for Global sea-Level Changes. Rice University, Houston, Texas, Tese de Doutorado, 354 p., 1998.

AGUIAR L. F. Análise de Atributos na Identificação de Feições Sísmicas Associadas à Presença de Hidratos de Gás na Bacia da Foz do Amazonas. Trabalho de Conclusão de Curso, UFF, Niterói, RJ, 2017.

ASMUS, H. E; PORTO, R. **Classificação das bacias sedimentares brasileiras segundo a tectônica de placas.** *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 26. Belém, Anais: SBG, v. 2, p. 667-690, 1972.

ASMUS, H. E. Controle Estrutural da Deposição Mesozoica nas Bacias da Margem Continental Brasileira. Revista Brasileira de Geociências, v. 5 nº. 3, p. 160-175, 1975.

BARBOZA, E. G.; TOLDO Jr. E. E.; TOMAZELLI, L. J.; DILLENBURG, S.R.; AYUP-ZOUAIN, R.N. Stratigraphic and holoceninc evolution of the submerged platform of the eastern margin of the Lagoa dos Patos Iagoon, RS. Journal of Coastal **Research**, Itajaí-SC, SI 39, v. 1, p. 266-269, 2006.

BARROS, C. S. Análise de Atributos Sísmicos Para Caracterização de Hidratos de Gás no Cone do Rio Grande. Trabalho de Conclusão de Curso, UFF, Niterói, RJ, 2009.

BERNDT, C.; BÜNZ, S.; CLAYTON, T.; MIENERT, J.; SAUNDERS, M. Seismic character of bottom simulating reflectors: examples from the mid-Norwegian margin. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v.21, n. 6, p. 723-733, 2004.

BIZZI, L. A; SCHOBBENHAUS, C; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. Geologia, Tectônica E Recursos Minerais Do Brasil : Texto, Mapas & SIG. Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 692 p., 2003.

BROKER, K. **The Arctic Biodiversity Congress, 2014.** https://arcticbiodiversity.is/program-2014/presentations/december-3/1030-1200/ecocharac-energy/116-broker-caff-presentation-dec3/file, acessado em 05/09/2018.

BUENO, G. V.; ZACHARIAS A. A.; OREIRO, S. G.; CUPERTINO J. A.; FALKEINHEIN F. U. H.; NETO M. A. M. Bacia de Pelotas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 551-559, 2007.

CLENNELL, M. B. Hidrato de gás submarino: natureza, ocorrência e perspectives para exploração na margem continental Brasileira. **Brazilian Journal of Geophysics**, vol. 18 (3), 2000.
COHEN, J. K.; STOCKWELL, Jr. J. W. **CWP/SU:** Seismic Un*x Release No. **44R11:** an open source software package for seismic research and processing, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines, 2017.

CONTRERAS J.; ZUHLKE, R.; BOWMAN, S.; BECHSTADT, T. Seismic stratigraphy and subsidence analysis of the southern Brazilian margin (Campos, Santos and Pelotas basins). **Marine and Petroleum Geology**, v. 27, p. 1952-1980, 2010.

dBG EARTH SCIENCE. **Opendtect 6.2.0**, 2018.

DIAS, J. L.; SAD, A. R. E.; FONTANA, R. L.; FEIJÓ, F. J. Bacia de Pelotas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 28, nº. 1, p. 235-245, jan/mar. 1994.

FONTANA, R. L; MESSUMECI, A. Hydrates Offshore Brazil. In **International Conference on Natural Gas Hydrates**, p. 106-113. Annals New York Academy os Science, 1994.

FONTANA, R. L. Geotectônica e Sismoestratigrafia da Bacia de Pelotas e Plataforma de Florianópolis. UFRGS, Porto Alegre, RS, Tese de Doutorado. 214 p., 1996.

FRANCELINO, A. V. M. Interpretação e Análise de Atributos do Levantamento Sísmico 3D da Área do Alto de Sirizinho (Bacia Sergipe-Alagoas, Nordeste do Brasil). Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, RN, 2011.

FREIRE, A. F. M. Controle estrutural-estratigráfico na distribuição de hidratos e gases livres do anticlinal Umitaka, Bacia Joetsu, margem leste do Mar do Japão. **Boletim de Geociências da Petrobras,** Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p. 63-84, 2013.

HARDAGE, B. Instantaneous seismic attributes calculated by the Hilbert Transform: Search and Discovery Article #40563, 2010.

HOVLAND, M.; JUDD, A.G. Focus on North Sea Pockmarks. In Hovland, M. & Judd, A.G. (eds.). Seabed Pockmarks and Seepages: Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. Graham & Trotman, London, UK. Cap. 2, p. 6-34, 1988.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**, 3rd edition, Blackwell Science, 2002.

LIMA, L. M. G. Análise de Atributos Sísmicos para Modelagem da Porosidade Efetiva do Campo de Namorado, Bacia de Campos. Trabalho de Conclusão de Curso, UNICAMP, Campinas, SP, 2012.

LÓPEZ, L. A. C. Interpretação Sismoestratigráfica e Geomorfologia Sísmica do **Cone Rio Grandeo, Bacia de Pelotas**. UFRGS, Porto Alegre, RS, Tese de Doutorado. 160 p., 2009.

LUDMANN, T., WONG, H.K. Characteristics of gas hydrate occurrences associated with mud diapirism and gas escape structures in the northwestern Sea of Okhotsk. Marine Geology 201:269-286, 2003.

MARTINS, I. R. Modelo Sedimentar do Cone de Rio Grande. Pesquisas em Geociências, 16 (16), UFRGS, Porto Alegre, RS, 100 p., 1984.

MARTINS, L. R.; MARTINS, I. R.; URIEN, C. M. Aspectos Sedimentares da Plataforma Continental na Área de Influência do Rio de La Plata. Gravel. 1, p. 68-80, 2003.

Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo, 2018. http://www.usp.br/nereus/?dados=brasil, acessado em 25/09/2018.

ROSA, M.L.C.C.; AYUP-ZOUAIN, R.N.; BARBOZA, E.G. **Utilização de Seções Sísmicas 2D na Identificação de Zonas de Escapes de Fluidos**. Gravel, nº 4, p. 109-118, 2006.

ROSA, A. P. Interpretação Sismo-Estratigráfica da porção da Bacia De Pelotas que engloba o Cone do Rio Grande e a avaliação do seu potencial petrolífero. UENF, Macaé, RJ. Tese de Doutorado. 299 p., 2007.

SAD, A.R.E.; SILVEIRA, D.P.; MACHADO, M.A.P. **Hidratos de gás marinhos: a mega-ocorrência da Bacia de Pelotas/Brasil**. *In*: SBGf, International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 5, São Paulo, *Expanded Abstracts*, p. 71-74, 1997.

TANER, M. T.; KOEHLER, F.; SHERRIF, R. Complex seismic trace analysis. **Geophysics**, v. 44, nº. 6, p. 1041–1063, 1979.

TEIXEIRA W.; TOLEDO M. C.; FAIRCHILD T. R.; TAIOLI F., (Org.) **Decifrando a Terra**, 2^a edição, São Paulo: Companhia Editora Nacional, p. 105, 2009.

WESSEL, P. & SMITH W. H. F. GMT (Generic Mapping Tools), 2018.

YILMAZ, O. Seismic Data Analysis - Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data. Investigations in Geophysics Series No. 10. SEG, 2001.

APÊNDICE A

```
#!/bin/sh
gmt gmtset PS_MEDIA A3
#-----
#line_bp=0231-0488
                      #line01
#line_bp=J00B222
                       #line02
#line_bp=J00B336
                       #line03
line_bp=J99B137
                       #line04
#line_bp=J99B194
                       #line05
#line bp=J00B166A
                      #line06
#line_bp=J00B291
                       #line07
#line bp=J00B351
                      #line08
#line_bp=J99B187
                      #line09
#line bp=J99B258
                      #line10
#-----
echo "Choose the seismic attribute: 1) original 2) envelope 3) phase 4) frequency"
read n
case $n in
  1)
     echo "Selected option - original data"
     mode="original"
     cp ${line_bp}.su temp1.su
     cpt="polar"
     break
     ;;
 2)
     echo "Selected option - envelope"
     mode="envelope"
     suattributes < ${line bp}.su mode=amp | sugain agc=1 > temp1.su
     cpt="gray"
     break
     ;;
  3)
     echo "Selected option - phase"
     mode="phase"
     suattributes < ${line_bp}.su mode=phase | sugain agc=1 > temp1.su
     cpt="gray"
     break
     ;;
  4)
     echo "Selected option - frequency"
     mode="frequency"
     suattributes < ${line_bp}.su mode=freq | sugain agc=1 > temp1.su
     cpt="Spectral.cpt"
     break
     ;;
  *)
```

echo "invalid option"

esac

#-----

cdpmin=`surange < temp1.su key=cdp | grep 'cdp' | awk '{ print \$2 }` cdpmax=`surange < temp1.su key=cdp | grep 'cdp' | awk '{ print \$3 }'` dt=`surange < temp1.su key=dt | grep 'dt' | awk '{ print \$2/1000000 }'` ns=`surange < temp1.su key=ns | grep 'ns' | awk '{ print \$2 }'` dw=`python -c "print \$dt * \$ns"`

ntraces=`surange < temp1.su key=cdp | grep 'traces:' | awk '{ print \$1 }'` #-----

segyhdrs < temp1.su | segywrite conv=0 format=5 endian=0 tape=temp1.sgy #------

gmt segy2grd temp1.sgy -Gtemp1.nc -R1/\${ntraces}/0/\${dw} -M\${ntraces} -I1/\$dt

#-----

gmt grdhisteq temp1.nc -N -Gtemp1h.nc

#-----

gmt grd2cpt temp1h.nc -C\$cpt -Z -I -Ne > temp1.cpt

#-----

gmt psbasemap -R0/\${ntraces}/0/\${dw} -JX24c/-7.5c -Bxa1000f500+l"Trace number" -Bya1f0.5+l"TWT (s)" -BWSen+t"Line \${line_bp} - \${mode}" -Xc -Y30c -P -K > \${line_bp}.ps

gmt grdimage -R -J temp1h.nc -Ctemp1.cpt -K -O >> \${line_bp}.ps

#-----

awk '{if (NR>2) print \$1, \$2/1000}' seafloor_\${line_bp}.dat | gmt sample1d -Af -Fa -T1/\${ntraces}/1 --GMT_EXTRAPOLATE_VAL='extrap' | gmt psxy -R -J -B -W2p,red t70 -K -O >> \${line_bp}.ps

awk '{if (NR>2) print \$1, \$2/1000}' basement1_\${line_bp}.dat | gmt sample1d -Af -Fa -T1/\${ntraces}/1 --GMT_EXTRAPOLATE_VAL='extrap' | gmt psxy -R -J -B -W2p,blue -t70 -K -O >> \${line_bp}.ps

#-----

awk '{ print \$3, -0.5, \$4 }' \${line_bp}_ip.txt | gmt pstext -R -J -B -F+f8,Helvetica-Bold+jTC -N -K -O >> \${line_bp}.ps

awk -v dw=\${dw} '{ printf (\$3 "\t0\n" \$3 "\t" dw "\n>\n") }' \${line_bp}_ip.txt | gmt psxy -R -J -B -W2p,red -t80 -K -O >> \${line_bp}.ps

#-----gmt psxy \${line_bp}.geom -R-50.6348446918/-48.8525494626/-33.9120540981/-

32.3658059776 -JX2c/2c -Bx -By -Bwsne -W2p,red --PS_LINE_CAP=round -X22c -Y5.5c -K -O >> \${line_bp}.ps

gmt psxy lines_bp.geom -R -J -W1p -O >> \${line_bp}.ps

#-----

gmt psconvert -Tf -A \${line_bp}.ps #psconvert -Tj -A \${line_bp}.ps evince \${line_bp}.pdf & exit

APÊNDICE B

```
#!/bin/sh
#-----
         _____
                                    ------
#line bp=0231-0488
                           #line01
#line_bp=J00B222
                      #line02
#line_bp=J00B336
                      #line03
#line_bp=J99B137
                      #line04
#line bp=J99B194
                      #line05
line bp=J00B166A_ph
                           #line06
#line bp=J00B291
                      #line07
#line bp=J00B351
                      #line08
#line bp=J99B187
                      #line09
#line bp=J99B258
                      #line10
#-----
dt=`surange < ${line bp}.su key=dt | grep 'dt' | awk '{ print $2/1000000 }`
ns=`surange < ${line_bp}.su key=ns | grep 'ns' | awk '{ print $2 }`
dw=`python -c "print $dt * $ns"`
ntraces=`surange < ${line_bp}.su key=cdp | grep 'traces:' | awk '{ print $1 }'`
#-----
echo "0 0" > modelfile
echo "${ntraces} 0" >> modelfile
echo "1. -99999" >> modelfile
awk '{if (NR>2) print $1-1, $2/1000}' seafloor ${line bp}.dat | gmt sample1d -Af -Fa -
T0/${ntraces}/1 --GMT EXTRAPOLATE VAL='extrap' >> modelfile
npmax=12156 #`wc -I modelfile | awk '{ print $1 }'`
echo "$npmax traces and $ns samples"
echo "1. -99999" >> modelfile
awk '{if (NR>2) print $1-1, $2/1000}' basement1_${line_bp}.dat | gmt sample1d -Af -
Fa -T0/${ntraces}/1 --GMT_EXTRAPOLATE_VAL='extrap' >> modelfile
echo "1. -99999" >> modelfile
# use unif2 to build the velocity profile
unif2 < modelfile ninf=2 npmax=\{npmax\}\ fx=1 dx=1 dz=0.004 nx=\{npmax\}\
nz=${ns} v00=1490,2500,5000 dvdz=0.0,50,0.0 > vel ${line bp}.bin
transp n1=$ns < vel ${line bp}.bin > vel ${line bp} transp.bin
# view the velocity profile on the screen
hbox=400 legend=2 cmap=hsv6 title="Modelo ${line_bp} " label1="Tempo (ms)"
label2="Tracos" units="m/s" &
suaddhead < vel_${line_bp}.bin ns=$ns | sushw key=dt a=4000 > vel_${line_bp}.su
       vfile=vel_${line_bp}_transp.bin dz=3
                                          nz=${ns}
                                                     < ${line bp}.su
suttoz
                                                                       >
${line_bp}_mig.su
velconv intype=vintt outtype=vintz dt=$dt nz=$ns dz=5 nx=$ntraces verbose=1 <
vel_${line_bp}.bin > vel_${line_bp}_toz.bin
ximage < vel_${line_bp}_toz.bin n1=${ns} d1=5 wbox=800 hbox=400 legend=1
cmap=hsv6 title="Modelo de velocidade ${line_bp}" label1="Profundidade (m)"
label2="Tracos" units="m/s" &
exit
```