

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Avaliação de Atributos Sísmicos utilizados no reconhecimento de Hidratos de  
Gás no Cone do Amazonas

Rodrigo da Silva Canario

Niterói  
2013

RODRIGO DA SILVA CANARIO

AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS SÍSMICOS UTILIZADOS NO  
RECONHECIMENTO DE HIDRATOS DE GÁS NO CONE DO AMAZONAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Programa de Graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito final para obtenção do grau de bacharel em Geofísica.

Orientador:  
Arthur Ayres Neto

NITERÓI  
2013

RODRIGO DA SILVA CANARIO

Avaliação de Atributos Sísmicos utilizados no reconhecimento de Hidratos de Gás no Cone  
do Amazonas

Aprovada em 13 de agosto de 2013

BANCA EXAMINADORA:

---

**Arthur Ayres Neto, D.Sc.**

---

**Eliane da Costa Alves, D.Sc.**

---

**Cleverson Guizan Silva, D.Sc.**

NITERÓI

2013

“Sente-se diante dos fatos como uma criança e prepare-se para sacrificar todas as noções preconcebidas, prossiga humilde por toda parte e por todos os abismos a que a Natureza o levar, ou você não aprenderá nada.” — T. H. Huxley

## Resumo

O Cone do Amazonas destaca-se como uma feição imponente, constituída por uma volumosa cunha sedimentar progradante que se estende desde o talude até cotas batimétricas em torno de 4 km de profundidade.

Essa região dispõe de uma riqueza geológica abordada por diversos objetos de estudo, entre eles está a ocorrência de hidratos de gás. Os hidratos de gás, ou *clatratos*, conformam-se em estruturas cristalinas compostas por moléculas de água (H<sub>2</sub>O) e de gases com peso molecular pequeno.

A melhor forma de detecção dos hidratos de gás em larga escala tem sido a sísmica de reflexão, aonde são analisados basicamente dois padrões sísmicos: o BSR (Bottom Simulating Reflection) e o *blanking* (blindagem, branqueamento). No caso da região do Cone do Amazonas as ocorrências dos hidratos de gás estão associadas principalmente ao BSR, sendo o *blanking* destacado somente por meio de atributo sísmico. O BSR caracteriza-se por ser um refletor geralmente paralelo ao fundo marinho e com uma amplitude polarizada em relação ao mesmo, esse efeito é dado pelo contraste de impedância acústica entre a zona de estabilidade dos hidratos de gás (alta velocidade) e a camada de gás livre situada abaixo desta (baixa velocidade).

Por vezes a identificação de padrões sísmicos relacionados aos hidratos num perfil sísmico comum não é clara, em face a essa problemática os atributos sísmicos foram utilizados e avaliados no tangente à sua eficácia em mitigar incertezas, ou em agregar informações concernentes aos hidratos. Os atributos utilizados foram: Fase Instantânea, Envelope e *Average Energy*.

Todos os atributos foram bem sucedidos para caracterizar a ocorrência de hidratos de gás, cada um agregando informações por critérios distintos. O atributo sísmico de Fase Instantânea mostrou grande eficiência para visualização da continuidade lateral das camadas (terminações do BSR), na caracterização do *blanking* e para identificação de truncamentos, especialmente nas terminações. O atributo de Envelope serviu para a caracterização do BSR, tanto em regiões deformadas por dobramentos, como em regiões de estratificação plano paralela, destacando os limites verticais da zona de estabilidade dos hidratos de gás.. O atributo *Average Energy* apresentou resultados análogos aos do Envelope, porém com ênfase ainda maior na recuperação de algumas reflexões importantes para a interpretação de processos associados a hidratos.

## Abstract

The Amazon Cone stands out as an impressive feature, consisting of a massive sediment wedge prograded sediment that extends from the shelf break to water depths of around 4 km deep.

This region has been greatly approached by various geological objects of study, among them is the occurrence of gas hydrates. The gas hydrates, or clathrates, conforms to crystalline structures composed of water molecules (H<sub>2</sub>O) and gases with small molecular weight.

The most successful way to detect the gas hydrates on a large scale has been seismic reflection, where they are analyzed basically by two seismic patterns: the BSR (Bottom Simulating Reflection) and blanking (blind zone). When it comes about the area of Amazon Cone, the occurrence of gas hydrates is mainly associated with BSR, and the blanking is detached or revealed only by means of seismic attribute. The BSR is characterized by a reflector parallel to the seabed and a inverse polarity reflection coefficient over the same, this effect is given by contrast acoustic impedance between the zone of stability of the gas hydrates (high speed) and the free gas layer situated below it (low speed). Also, in general the BSR has a high reflection coefficient if compared to others reflectors on the seismic profile.

Many times the identification of seismic patterns and trends of gas hydrates in seismic profile is a hard work to do and sometimes even impossible, and that's why seismic attributes were used to evaluate their efficacy in reducing uncertainties, or even to add more information concerning the hydrates. The attributes used were: Instantaneous Phase, Envelope and Average Energy.

All the seismic attributes were successful to characterize the occurrence of gas hydrates, each one brought out precious information by different criteria of analysis. The seismic attribute Instantaneous Phase was very efficient for visualizing the lateral continuity of the layers (BSR edges), particularly when appeared the truncation of thin beds. The Envelope attribute characterizes the BSR in both situations, either sedimentary layers deformed by folding, or in plane parallel layers, highlighting the vertical limits of the gas hydrates stability zone. This is only possible due to its direct relationship with the instantaneous energy, and at the same time completely independence of full phase, it has highlighted the contrast in acoustic impedance between the gas hydrates stability zone and the free gas zone. The attribute Average Energy showed comparable results to the envelope, but with even greater emphasis on the recovery of some important reflections to take in considerations for the interpretation of geological processes associated with hydrates.

## **Agradecimentos**

A todos os amigos que fiz durante essa graduação, e com os quais pude dividir tanto os momentos de alegria, como também o pesar de algumas dificuldades. Entre estes amigos estão: Ariel (trakinas), Adriana Bello, Bruno Heinen (Salsa), Bruno (Capitão), Igor Areas (Bruxo), Felipe Brandão (Latino), Luiz Henrique (Away), Jonne Clay (Argila), Fabricio Loreiro (Fafá), Fabricio Lima (Falcatrua), Felipe Cruz, Larissa, Kaio Pecly, Rodolpho Abilio, Filipe Japiassu (Massa), Kenji Motoki (Japa), Gabriel Meliato (Meliante), Gabriela Martins (A Tensa), Igor (Cabeça), Monique, Letícia Nigro, Letícia Regina, Nathalia Ladeira, Juliana Mota (Morena), Carolina Antonioli (Carol), Caroline, Victor Alberone (Albirela), Vitor Gomes (Baiano), Rafael Rocha Leão, Giovanni Trapatone (Bola), Thonia, João Muniz (Caninha), Bruno Burguion (Brunão), Shayane Gonzalez, Lisandra, Lis Rocha, Fernanda Viana, Igor Guaragna (Guaraná), Natalia Reis, Vitor Schuback, Lucas (Surfista).

Agradeço a todos os professores que me apoiaram, me passando conhecimentos diversos que me permitiram chegar a síntese deste trabalho, entre eles estão: Arthur Ayres Neto, Cleverson Guizan Silva, José Antonio Baptista Neto, e a coordenadora do curso que sempre se empenhou para ajudar na evolução do curso, Eliane da Costa Alves.

Aos amigos de estágio na empresa MAG que me ajudaram em diversas etapas do meu desenvolvimento profissional e pessoal, são eles: Marcos Santos, Nara Pinto, Viviane, Rodrigo Perovano.

## Sumário

Introdução.....	14
1. Área de Estudo.....	15
1.1    Localização .....	15
1.2    Estruturação do Arcabouço Tectônico.....	16
1.3    Dinâmica Tectono-Sedimentar .....	19
1.4    Gênese e Evolução do Cone do Amazonas .....	22
2 Metodologia e Dados Utilizados.....	26
3 Hidratos de Gás.....	29
3.1    Definição e Propriedades .....	29
3.2    Ambientes de HGs e sua Distribuição .....	33
3.3    A Origem dos HGs .....	37
3.4    Caracterização de HGs.....	39
3.5    Processos de MTD e sua associação com os HGs no Cone do Amazonas....	45
4 Atributos Sísmicos.....	47
5 Resultados e Discussão .....	56
5.1    Identificação de hidratos de gás no Cone do Amazonas .....	56
5.2    Average Energy .....	67
5.3    Envelope .....	72
5.4    Fase Instantânea.....	78
6 Conclusão.....	83
Referências Bibliográficas.....	84

## Índice de Figuras

FIGURA 1.1: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO CONE DO AMAZONAS DENTRE PROVÍNCIAS MORFOESTRUTURAIS. MODIFICADO DE (OLIVEIRA, 2005).	15
FIGURA 1.2: MAPA DE BATIMETRIA PREDITA COM LOCALIZAÇÃO DAS BACIAS MARGINAIS DA MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA. RETIRADO DE (SMITH E SANDWELL, 1994).	16
FIGURA 1.3: MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA MOSTRANDO OS SEGMENTOS TRANSFORMANTES CISALHANTES E SEGUIMENTOS DE MARGEM PASSIVA TRANSFORMANTE. RETIRADO DE (MOULIN, 2010).	17
FIGURA 1.4: CARTA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DA FOZ DO AMAZONAS. RETIRADO DE (FIGUEIREDO ET AL., 2007).	21
FIGURA 1.5: MAPA BATIMÉTRICO OBTIDO COM DADOS DO LEPLAC DENOTANDO A MORFOLOGIA E A ABRANGÊNCIA DO CONE DO AMAZONAS, AS LINHAS ESTÃO ESPAÇADAS EM COTAS DE 100 METROS. RETIRADO DE (LEPLAC FASE 1).	23
FIGURA 1.6: MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE FÁCIES E UNIDADES SÍSMICAS NUMA ARQUITETURA SEDIMENTAR DE SISTEMA CHANNEL-LEVEES NO CONE DO AMAZONAS. RETIRADO DE (DAMUTH, 2002)	25
FIGURA 1.7: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO EM PLANTA MOSTRANDO A PROLIFERAÇÃO ESPACIAL DO SISTEMA DE CHANNEL-LEVEES E A PROPOSTADE DOIS MODELOS DE CONES. RETIRADO DE (DAMUTH, 2002).	25
FIGURA 1.8: SEÇÃO SÍSMICA INTERPRETADA MOSTRANDO FEIÇÕES COMPRESSIVAS DO TECTONISMO GRAVITACIONAL E OS MOVIMENTOS DE MASSA ASSOCIADOS A ELAS. RETIRADO DE (PEDERNEIRASET AL., 2008).	26
FIGURA 2.1: LOCALIZAÇÃO DAS LINHAS ANALIZADAS NA ÁREA DE ESTUDO. RETIRADO DE (LEPLAC-FASE 1)	28
FIGURA 3.1: (A) REPRESENTA O HG COMO É VISTO A OLHO NU, SEMELHANTE AO GELO (ADAPTADO DE CLENNELL, 2000); (B) TRÊS POSSÍVEIS ESTRUTURAS MOLECULARES DO HG, A TIPO I POSSUI A FORMA PARA COMPOSTOS GASOSOS MAIS LEVES, A TIPO II E TIPO III COMPORTAM MOLÉCULAS DE HIDROCARBONETOS MAIORES (MODIFICADO DE THAKUR, 2011); (C) FORMA MOLECULAR MAIS COMUM DO HG, APRISIONAMENTO DE METANO. MODIFICADO DE (THAKUR, 2011).	30
FIGURA 3.2: TABELA (A) - MOSTRA TÍPICAS ESTRUTURAS NATURAIS DE CRISTAIS DE HG E SEUS RESPECTIVOS COMPOSTOS ASSOCIADOS (FREITAS 1990). TABELA (B) - MOSTRA A SÉRIE DE N-ALCANOS COM MENOS DE 5 ÁTOMOS DE CARBONO E SEUS VALORES DE COMBUSTÃO. O METANO COMO GÁS DE MAIOR VALOR DE COMBUSTÃO POR GRAMA (KJ/G) INDICA QUE PARA UM DADO VOLUME FIXO DE GÁS A ENERGIA LIBERADA POR ELE É MAIOR DO QUE A DOS OUTROS. RETIRADO DE (TANAKA, 2003)	31
FIGURA 3.3: (A) PROPRIEDADES FÍSICAS DOS HGS; (B) ÁBACO DE TEMPERATURA E PRESSÃO INDICANDO A LINHA DE ESTABILIDADE PARA HGS COM METANO E SUA TENDÊNCIA À INSTABILIDADE CONFORME A PROPORÇÃO DE OUTRAS MOLÉCULAS MAIS OU MENOS PESADAS JUNTO AO COMPOSTO. MODIFICADO DE (CLENNELL, 2000).	32
FIGURA 3.4: O GRÁFICO ILUSTRA AS PROPORÇÕES DE CARBONO EM DIFERENTES TIPOS DE FONTES COMBUSTÍVEIS. RETIRADO DE (FREIRE, 2012)	33
FIGURA 3.5: MAPA COM TODOS OS TESTEMUNHOS AO REDOR DO GLOBO QUE INDICARAM PRESENÇA DIRETA OU INFERIDA DE HGS. RETIRADO DE (THAKUR, 2011).	34
FIGURA 3.6: (A) DISTRIBUIÇÃO DE PERMAFROST NO HEMISFÉRIO NORTE, (B) LOCALIZAÇÃO DAS BACIAS SEDIMENTARES DO HEMISFÉRIO NORTE E AS RESPECTIVAS ÁREAS (PREENCHIDAS DE PRETO) COM POTENCIAL CONTINGENTE DE HIDRATOS DE GÁS. MODIFICADO DE (MAX, 2003).	35

- FIGURA 3.7: OCORRÊNCIAS DE HIDRATOS DE GÁS NA MARGEM CONTINENTAL BRASILEIRA. OS PONTOS VERMELHOS INDICAM AS OCORRÊNCIAS IDENTIFICADAS POR LINHAS SÍSMICAS, O PONTO AMARELO INDICA UMA POSSÍVEL OCORRÊNCIA CITADA NA LITERATURA. RETIRADO DE (TANAKA, 2003). 36
- FIGURA 3.8: PERFIL SÍSMICO DE ALTA RESOLUÇÃO MOSTRANDO O BSR INTERPRETADO ADJACENTE A UM DEPÓSITO DE MOVIMENTO MASSA NO CONE DO AMAZONAS. RETIRADO DE (FLOOD *ET AL.*, 1997). 37
- FIGURA 3.9: (A) NÍVEIS DE SULFATO E METANO POR PROFUNDIDADE (MODIFICADO DE USSLER & PAUL, 2008), (B) NÍVEIS DE OXIDAÇÃO ANAERÓBICA DO METANO EM RELAÇÃO À ZONA DE SULFATO-REDUÇÃO. MODIFICADO DE (HARDAGE AND ROBERTS, 2006). 38
- FIGURA 3.10: (A) RESPOSTA TEÓRICA DA ONDA SÍSMICA NO FUNDO DO MAR E NA GAS HYDRATE STABILITY ZONE (GHSZ) (ADAPTADO DE TOMASINI, 2011); (B) RESPOSTA SÍSMICA DE UMA SEÇÃO NA MARGEM CONTINENTAL DO URUGUAY (ADAPTADO DE TOMASINI, 2011); (C) ESQUEMA REPRESENTATIVO DA CURVA DE ESTABILIDADE DE HIDRATOS DA GÁSE DA CURVA GEOTÉRMICA DOS SEDIMENTOS MARINHOS, NA CAMADA DE INTERSEÇÃO ENTRE AS DUAS SE FORMA O HIDRATO DE GÁS, E LOGO ABAIXO MOSTRA A ZONA DE GÁS LIVRE, CUJOCONTRASTE DE VELOCIDADE APARECE NA SÍSMICA NA FORMA DE BSR (CLENNELL, 2000). DESTAQUE PARA OS CONTRASTES DE VARIAÇÃO DA VELOCIDADE SÍSMICA. 41
- FIGURA 3.11: BSR APONTADO PELAS SETAS NO CONE DO AMAZONAS, DESTACA-SE QUE, NESTE CASO, ELE ESTÁ SUBPARALELO AOS DEMAIS PLANOS DE ACAMAMENTO NA MAIOR PARTE DO PERFIL. RETIRADO DE (TANAKA, 2003). 42
- FIGURA 3.12: O BSR (EM AZUL) QUE APARECE CORTANDO ESTRUTURAS PRÉ-DEFORMADAS FOI LOCALIZADO NO CONE DO AMAZONAS E IDENTIFICADO PELO GRUPO GEOMARGEM. 42
- FIGURA 3.13: (A) ESTRUTURA HONEYCOMB ENCONTRADA NO TESTEMUNHO DO FURO 935 (FLOOD *ET AL.* 1995), (B) MAPA DO CONE DO AMAZONAS COM OS RESPECTIVOS MOVIMENTOS DE MASSA MAPEADOS ATÉ ENTÃO E A LOCALIZAÇÃO (CIRCULO VERMELHO) DO FURO 935 DA LEG 155 DA ODP. RETIRADO DE (MASLIN, 2005). 43
- FIGURA 3.14: RETIRADA DE PISTÃOS DE AMOSTRAGEM. CHAMA A ATENÇÃO O ESTRAVAZAMENTO DOS SEDIMENTOS EXPULSOS PELO GÁS DISSOCIADO DOS HIDRATOS CONTIDOS NO PISTÃO. RETIRADO DE (FREIRE, 2012). 44
- FIGURA 3.15: COMPILAÇÃO DE IMAGENS ONDE OS HIDRATOS DE GÁS APARECEM EM DIVERSAS EM TESTEMUNHOS. RETIRADO DE (FREIRE, 2012). 44
- FIGURA 3.16: GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE OS DIAGRAMAS DE FASE E A TEMPERATURA DA ÁGUA PARA A REGIÃO. O GRÁFICO CONSIDERA O CONJUNTO DE PLOTS QUE FORMA CURVAS PARA GÁS METANO PURO, GÁS DE ORIGEM BIOGÊNICA E GÁS DE ORIGEM TERMOGÊNICA E AS TEMPERATURAS DA ÁGUA PARA CADA PROFUNDIDADE. INDICATIVOS TEÓRICOS APONTAM PARA CONDIÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS FAVORÁVEIS PARA A FORMAÇÃO DE HG EM TORNO DE 320 – 350 M E 11,5° C PARA O METANO TERMOGÊNICO; E DE 600 M E 6,5° C PARA GÁS METANO PURO OU BIOGÊNICO. RETIRADO DE (TANAKA, 2003). 45
- FIGURA 3.17: LOCALIZAÇÃO DOS DEPÓSITOS DE TRANSPORTE DE MASSA MAPEADOS POR DIVERSOS AUTORES (ARAÚJO, 2008, REIS *ET AL.*, 2009) E DAS OCORRÊNCIAS DE HIDRATOS (EM LARANJA) MAPEADAS POR MELO *ET AL.*, 2008. MODIFICADO DE (MELO, 2009). 46
- FIGURA 3.18: SEÇÃO SÍSMICA INTERPRETADA COM O BSR EM AMARELO, AS FALHAS REVERSAS DA FRENTE COMPRESSIVA DO CONE DO AMAZONAS E OS DEPÓSITOS DE MOVIMENTOS DE MASSA REPRESENTADOS PELA COR LARANJA. RETIRADO DE (MELO, 2009). 47
- FIGURA 4.1: LINHA DO TEMPO DOS ATRIBUTOS SÍSMICOS DE 1960 ATÉ 2000 MOSTRANDO A EVOLUÇÃO DOS ATRIBUTOS JUNTO COM O ESTUDO DA SÍSMICA. OS PAPERS MAIS

- IMPORTANTES ESTÃO EM DIAGONAL ENQUANTO OS ATRIBUTOS APARECEM EM ITÁLICO. RETIRADO DE (BARNES, 2001). 48
- FIGURA 4.2: CLASSIFICAÇÃO DE ATRIBUTOS SÍSMICOS SEGUNDO. RETIRADO (BROWN, 2001). 50
- FIGURA 4.3: REPRESENTAÇÃO ESPACIAL-TEMPORAL DO SINAL COMPLEXO “Z(T)” E SUA RELAÇÃO COM A AMPLITUDE “A(T)” E A FASE DO SINAL “ $\Phi$  (T)”. (MODIFICADO DE HARDAGE, 2010) 51
- FIGURA 4.4: A) TRAÇO SÍSMICO (REAL), B) COMPONENTE IMAGINÁRIA DO SINAL (QUADRATURA), C) FASE INSTANTÂNEA, D) FREQUÊNCIA INSTANTÂNEA, E) ANÁLISE DE UM SINAL ANALÍTICO COMPLEXO, F) PROJEÇÃO DA COMPONENTE DE QUADRATURA (AMARELO) E COMPONENTE REAL (ABÓBORA) DE UM SINAL ANALÍTICO COMPLEXO, F) PROJEÇÃO DA COMPONENTE DE QUADRATURA (AMARELO) E COMPONENTE REAL (ABÓBORA) DE UM SINAL SÍSMICO COMPLEXO AO LONGO DO TEMPO. RETIRADO DE (CHOPRA & KURT, 2005) 53
- FIGURA 4.5: ILUSTRAÇÃO DE COMO É COMPUTADO O ATRIBUTO AVERAGE ENERGY DADA UMA JANELA DE TEMPO COM OS VALORES DAS AMPLITUDES REPRESENTADOS PELOS TRAÇOS (LANDMARK, 2004). 54
- FIGURA 4.6: COMPARAÇÃO ENTRE AMPLITUDE X FASE INSTANTÂNEA ILUSTRANDO A BLINDAGEM (BLANKING) DO BSR EM MEIO A CAMADAS ESTRATIGRÁFICAS DEFORMADAS. RETIRADO DE (BARROS, 2009). 55
- FIGURA 5.1: NESTA LINHA O BSR INTERPRETADO ESTÁ MARCADO PELO HORIZONTE EM VERDE. OBSERVA-SE QUE O MESMO ESTÁ INSERIDO NUMA ESTRUTURA EXTREMAMENTE VERTICALIZADA E QUASE SEM REFLETORES INTERNOS, CONFIGURANDO UMA ZONA SISMICAMENTE MONÓTONA. PELA EXTREMA VERTICALIZAÇÃO E PELO INTENSO ESMAECIMENTO INTERNO NA ESTRUTURA, É POSSÍVEL ESPECULAR SOBRE A EXISTÊNCIA DE GÁS LIVRE NA MESMA (EXAGERO HORIZONTAL = 2X). 57
- FIGURA 5.2: AQUI O ZOOM DE 4X ENQUADRA A ESTRUTURA QUE CONTÉM O BSR. OBS: O REFLETOR ASSOCIADO AO HIDRATO DE GÁS ESTÁ APONTADO PELA SETA E CRUZA OS POUCOS REFLETORES VISÍVEIS DE TODA A ESTRUTURA, ACOMPANHANDO O FUNDO MARINHO (EXAGERO HORIZONTAL = 2X). 58
- FIGURA 5.3: ESTA FIGURA MOSTRA A INTERPRETAÇÃO COM O BSR MARCADO PELO HORIZONTE EM VERDE (PARTE INFERIOR DA FIGURA). ESSA É A ÚNICA LINHA DO SETOR SUDESTE DO CONE DO AMAZONAS, NOTE QUE ESTA ESTRUTURA NÃO ESTÁ TÃO DEFORMADA QUANDO AS OUTRAS, NÃO HÁ REFLETORES INTERNOS DENOTANDO DEFORMAÇÕES, NO ENTANTO, O PRÓPRIO FUNDO MARINHO ESTÁ ABAULADO (EXAGERO VERTICAL = 2X) 59
- FIGURA 5.4: ZOOM (2X) ENQUADRADO NA ESTRUTURA QUE CONTÉM O BSR, NO QUADRO DO ZOOM FOI ATIVADO O RECURSO WIGGLE TRACE PARA REFORÇAR A POLARIDADE DOS REFLETORES MOSTRANDO CADA TRAÇO INDIVIDUALIZADO, RESSALTANDO OS REFLETORES DO FUNDO DO MAR E DO BSR COM A POLARIDA INVERTIDA, POSITIVA E NEGATIVA, RESPECTIVAMENTE, AMBOS APONTADOS PELAS SETAS (EXAGERO VERTICAL = 2X). 60
- FIGURA 5.5: NO ENQUADRAMENTO DESSE ZOOM A SETA APONTA PARA O QUE PARECE O FIM DO BSR QUE CHEGA AO PONTO MAIS PRÓXIMO DO FUNDO MARINHO EM TODO O TRABALHO. ALÉM DO PADRÃO BORRIFADO PROVAVELMENTE PROVENIENTE DE ALGUM ERRO DE PROCESSAMENTO, NOTA-SE QUE O FUNDO APARECE LEVEMENTE ESCARPADO (SHARP) POR CERCA DE 1,5 KM, SEM AS ONDULAÇÕES QUE APARECEM AO LONGO DO FUNDO ATÉ AQUELE PONTO. ABAIXO DA SETA, NA MEDIDA DO AUMENTO DE PROFUNDIDADE, ACOMPANHAM O FUNDO MARINHO UMA SÉRIE DE REFLETORES COM POLARIDADE NEGATIVA, BASTANTE DESCONTÍNUOS. ESSA OBSERVAÇÃO LEVA A SUGERIR UMA INCIPIENTE BASE DE ESTABILIDADE DE HIDRATOS DE GÁS, INTERPRETANDO QUE OS REFLETORES DESCONTÍNUOS SERIAM EFEITO DA FORMAÇÃO

- DE NOVOS NÓDULOS DE HIDRATOS DE GÁS QUE PROPICIAM A CIMENTAÇÃO A MEDIDA EM QUE ATINGEM A FASE SÓLIDA. 61
- FIGURA 5.6: LINHA SÍSMICA COM INTERPRETAÇÃO DO BSR MARCADO PELO HORIZONTE EM VERDE (PARTE SUPERIOR DA FIGURA) E SEM INTERPRETAÇÃO (PARTE INFERIOR DA FIGURA). NESTE SEGUNDO TRECHO DA LINHA 501-0031, ASSIM COMO NO TRECHO ANTERIOR, O BSR TAMBÉM ATRAVESSA UMA ESTRUTURA, AINDA QUE ESTA ESTEJA BEM MENOS DEFORMADA DO QUE AS DO SETOR NOROESTE DO CONE DO AMAZONAS (EXAGERO HORIZONTAL = 2X) 62
- FIGURA 5.7: ESTA LINHA COM O BSR INTERPRETADO, NO QUADRO DO ZOOM FOI ATIVADO O RECURSO WIGGLE TRACE PARA RESSALTAR O PREENCHIMENTO DAS AMPLITUDES DE CADA TRAÇO INDIVIDUALIZADO, RESSALTANDO ASSIM OS REFLETORES DO FUNDO DO MAR E DO BSR COM POLARIDADE POSITIVA E NEGATIVA, RESPECTIVAMENTE (EXAGERO HORIZONTAL = 2X) 63
- FIGURA 5.8: ESTA LINHA CONTÉM GRANDES ESTRUTURAS COMPRESSIVAS ONDE O BSR É IDENTIFICADO POR CRUZAR TODO O ESTRATO SEDIMENTAR DEFORMADO. A) O BSR QUE VINHA ACOMPANHANDO O FUNDO (1ª SETA) QUANDO SOFRE UMA FLEXURA ASCENDENTE (*PULL UP*) (2ª SETA) POR EFEITO DA PRESENÇA DE FLUIDOS TERMAIS, E DEPOIS SEGUE SUB-PARALELO AO FUNDO. B) AS TRÊS SETAS MARCAM PONTOS DE TRUNCAMENTO DO BSR ATRAVÉS DAS CAMADAS SEDIMENTARES DOBRADAS. C) NESTE PONTO O BSR PERDE BOA PARTE DA SUA AMPLITUDE, MAS AINDA SIM SE DESENVOLVE SUB-PARALELO AO FUNDO MARINHO E SEGUE CRUZANDO CAMADAS DEFORMADAS, NOTA-SE QUE O FUNDO MARINHO ESTÁ EMBOCADO PARA BAIXO, INDICANDO A POSSÍVEL INCISÃO DE UM CANAL. 64
- FIGURA 5.9: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS POLÍGONOS DE OCORRÊNCIA DE HIDRATOS DE GÁS. 66
- FIGURA 5.10: ATRIBUTO AVERAGE ENERGY, O ZOOM COM ENQUADRAMENTO NA ESTRUTURA ONDE FOI IDENTIFICADO O BSR MOSTRA QUE O ATRIBUTO RECUPERA A AMPLITUDE DO BSR QUE MAL ERA NOTADA NO PERFIL DE AMPLITUDE DA FIGURA 34, PERMITINDO UMA BOA VISUALIZAÇÃO DA SUA EXTENÇÃO (SETA BRANCA). O CRITÉRIO PRÉTERO DA POLARIDADE DO REFLETOR EM RELAÇÃO AO FUNDO MARINHO É IMPRESCINDÍVEL POIS NESTE ATRIBUTO NÃO SE PODE NOTAR TÃO BEM O TRUNCAMENTO DO BSR EM RELAÇÃO À ESTRUTURA DEFORMADA. 68
- FIGURA 5.11: ATRIBUTO AVERAGE ENERGY, AQUI NOTA-SE QUE O ATRIBUTO PROPICIA A RECUPERAÇÃO DA AMPLITUDE, E O JANELAMENTO DO ALGORÍTIMO DO ATRIBUTO PERMITE UMA MAIOR COESÃO DAS REFLEXÕES DO BSR, ANTES POUCO NOTADAS E ESPARSAS, DANDO UMA MELHOR NOÇÃO DA SUA CONTINUIDADE LATERAL. 69
- FIGURA 5.12: ATRIBUTO AVERAGE ENERGY, O ZOOM (2X) ENQUADRADO NA ESTRUTURA MOSTRA QUE O ATRIBUTO RESSALTA A MAGNITUDE DA REFLEXÃO DO BSR (SETA AZUL) QUE APARECE MUITO MAIOR DO QUE A DO FUNDO, ALÉM DE AMOSTRAR BEM A SUA CONTINUIDADE LATERAL, PERMITINDO ASSIM UMA AVALIAÇÃO QUALITATIVA DESSA ZONA DE HIDRATOS ENQUANTO SELANTE. 70
- FIGURA 5.13: ATRIBUTO AVERAGE ENERGY, DESTACA-SE NESTE ATRIBUTO OS BSRS COMO ALTAS REFLEXÕES EM RELAÇÃO AO FUNDO MARINHO. NESSA LINHA OS BSRS INTERPRETADOS ERAM EFÊMEROS (SETAS CINZAS), SEM CONTINUIDADE LATERAL. 71
- FIGURA 5.14: ATRIBUTO ENVELOPE, A ALTA ENERGIA INSTANTÂNEA ESTÁ REPRESENTADA PELO ESPESSE TRAÇO PRETO APONTADO PELA SETA BRANCA. NOTE QUE PRATICAMENTE NÃO HÁ REGISTRO DA ENERGIA INSTANTÂNEA DOS REFLETORES DA ESTRUTURA AONDE O BSR ESTÁ INSERIDO, ESSA SERIA MAIS UMA EVIDÊNCIA QUE EXPLICARIA A APRESENÇA DE GÁS LIVRE EM ABUNDÂNCIA NA ESTRUTURA. 73
- FIGURA 5.15: ATRIBUTO ENVELOPE, NESTA LINHA SETA APONTA PARA A ALTA ENERGIA INSTANTÂNEA QUE SEGUE NO ESPESSE TRAÇO PRETO ATÉ QUASE SE ENCONTRAR COM O

- FUNDO MARINHO. OBSERVA-SE TAMBÉM QUE A ALTA ENERGIA INSTANTÂNEA SEGUE MARCADA PARA BAIXO DE UMA ZONA ERODIDA ONDE POSSIVELMENTE O HIDRATO ESTARIA SE CONSOLIDANDO PARA FORMAR UMA NOVA ZONA DE ESTABILIDADE. 74
- FIGURA 5.16: ATRIBUTO ENVELOPE, NO PERFIL INFERIOR OBSERVA-SE O ESPESSE TRAÇO REPRESENTANDO A ALTA ENERGIA INSTANTÂNEA DO BSR INDICADO PELO HORIZONTE VERDE NA FIGURA SUPERIOR. NOTA-SE QUE ESTE ATRIBUTO NÃO PODE RESPONDER AO CRITÉRIO DE POLARIDADE NEGATIVA, JÁ QUE ELE SÓ ESTÁ ASSOCIADO AO COEFICIENTE DE ENERGIA INSTANTÂNEA DA REFLEXÃO. POR ESSE ATRIBUTO SE OBTÉM UM CRITÉRIO QUE É INCLUSIVO, MAS NÃO EXCLUSIVO. 75
- FIGURA 5.17: ATRIBUTO ENVELOPE, A SETA APONTA PARA UMA DAS ZONAS DE ALTA ENERGIA INSTANTÂNEA, MAS OBSERVA-SE TAMBÉM OUTRAS ZONAS ABAIXO DESTA. ISSO ILUSTRA QUE NESTE CASO O CRITÉRIO ESTABELECIDO PARA A IDENTIFICAÇÃO DE HIDRATOS DE GÁS ATRAVÉS DO ATRIBUTO ENVELOPE NÃO PODE SER ÚNICO, E A INTERPRETAÇÃO DEVE SER USADA EM CONCOMITÂNCIA COM OUTROS ATRIBUTOS QUE PERMITAM AVALIAR OUTROS CRITÉRIOS. 76
- FIGURA 5.18: ATRIBUTO ENVELOPE, NESTA LINHA OBSERVA-SE QUE TODOS OS BSRS IDENTIFICADOS NO PERFIL DE AMPLITUDE SÃO IGUALMENTE INDICADOS NO PERFIL DO ATRIBUTO ENVELOPE. NESTE CASO O CRITÉRIO DE TRUNCAMENTO DO BSR COM REFLETORES DAS CAMADAS SEDIMENTARES DEFORMADAS PODE SER USADO, MAS ALÉM DISSO PODE-SE ADOTAR AS ENERGIAS INSTANTÂNEAS ANÔMALAS EM CADA TRECHO DA LINHA. 77
- FIGURA 5.19: FASE INSTANTÂNEA, NESTA LINHA OBSERVA-SE OS TRUNCAMENTOS QUE SÃO APONTADOS PELAS SETAS NAS TERMINAÇÕES DOS HIDRATOS, PERMITINDO UMA BOA DELIMITAÇÃO DA SUA EXTENSÃO. 79
- FIGURA 5.20: FASE INSTANTÂNEA, AQUI A CONTINUIDADE LATERAL É DESTACADA PELAS DUAS SETAS COLOCADAS NOS DOIS PICOS DO RANGE DE FASE ( $180^{\circ}$  A  $-180^{\circ}$ ), A ÚLTIMA SETA LOCALIZADA À DIREITA MOSTRA O TRUNCAMENTO QUE QUASE CHEGA AO ENCONTRO DO REFLETOR DO FUNDO MARINHO. 80
- FIGURA 5.21: FASE INSTANTÂNEA, NESTE TRECHO DA LINHA AS SETAS SEQUENCIALMENTE APONTAM PARA A MUDANÇA DE FASE DE  $180^{\circ}$  DO AZUL MARINHO PASSANDO A  $0^{\circ}$  NA COR AMARELA E CHEGANDO A  $-180^{\circ}$  NA COR ROXA, NA INTERFACE COM A ZONA LIVRE DE GÁS. O ATRIBUTO ENFATIZA A FACILIDADE DE VISUALIZAÇÃO DA CONTINUIDADE LATERAL DO BSR. 81
- FIGURA 5.22: FASE INSTANTÂNEA, TODAS AS SETAS BRANCAS APONTAM PARA TRUNCAMENTOS QUE SE TORNARAM CLARAMENTE VISÍVEIS NAS TERMINAÇÕES DO BSR NO PERFIL DO ATRIBUTO, ALGUMAS TERMINAÇÕES PASSARIAM DESAPERCEBIDAS NO PERFIL DE AMPLITUDES. 82

## Introdução

Desde 1970 diversos pesquisadores (Damuth e Kumar, 1975, Azevedo, 1992; Gorini, 1993; Brandão, 1994; Bizzi *et al.*, 2003; Figueiredo, *et al.*, 2007) já vinham concentrando publicações sobre a Bacia da Foz do Amazonas com o viés morfoestrutural e tectono-sedimentar, e alguns outros desde 1990 (Oliveira, 2005; Reis *et al.*, 2008; Araújo, *et al.* 2009) com melhores técnicas de processamento puderam passar a visualizar estruturas mais profundas.

Tanto para fins acadêmicos quanto para fins industriais, a Bacia da Foz do Amazonas, e em especial, o Cone do Amazonas tem sido uma grande área de estudos onde se concentram temas diversos como progradação de cone sedimentar, tectonismo gravitacional, movimentos de massa, busca por hidrocarbonetos e etc.

O principal interesse industrial nos hidratos de gás até hoje é a sua estreita relação com as diversas fases de outros gases (sulfato-metano) (Malinverno, 2011) que podem servir de indicativos para acumulações mais promissoras na exploração petrolífera, mas ao mesmo tempo são potenciais fontes de energia, como grandes armazenadores de carbono, enquanto que academicamente os hidratos são estudados por seu potencial de desestabilização do fundo marinho que pode disparar movimentos de massa, ou por gerar feições peculiares no fundo marinho (*seeps, pockmarks*), mas a despeito desses fatos, os estudos nessa área ainda são relativamente incipientes (Hovland, 2006, Tanaka, 2003, Clennell, 2000, Freire, 2012, Maslin *et al.*, 2005; Araújo *et al.*, 2009).

Os hidratos de gás (HGs) são basicamente um composto de moléculas de água em forma sólida (gelo) que contém dentro de sua estrutura cristalina, moléculas de hidrocarbonetos. A formação de HGs está condicionada por parâmetros físico-químicos que só são encontrados em áreas bastante seletas, de acordo com uma zona de estabilidade extremamente sensível que é criada em determinados contextos geológicos (Freire, 2012; Clennell, 2000). Há diversas maneiras de se identificar HGs, e a mais eficaz para a detecção em larga escala é a sísmica de reflexão, na qual este trabalho estará calcado, juntamente com a extração de atributos sísmicos que surgem como potencial elemento auxiliar na interpretação das ocorrências (Barros, 2009).

# 1. Área de Estudo

## 1.1 Localização

A área de estudo está inserida no Cone do Amazonas que ocupa atualmente uma área de 120 mil km<sup>2</sup>, o que corresponde a aproximadamente 45% da área da Bacia da Foz do Amazonas, essa bacia se encontra geograficamente localizada entre os estados do Amapá e do Pará, no extremo norte do Brasil, setor oeste da Margem Equatorial Brasileira (Bizzi, *et al.*, 2003; Oliveira, 2003).

A figura 1.1 ilustra que no domínio oceânico o Cone do Amazonas está sitiado por unidades morfoestruturais bem pronunciadas como a Cadeia Norte Brasileira a sudeste, a Elevação do Ceará a leste e a Planície Absissal de Demerara a norte (Oliveira, 2005).

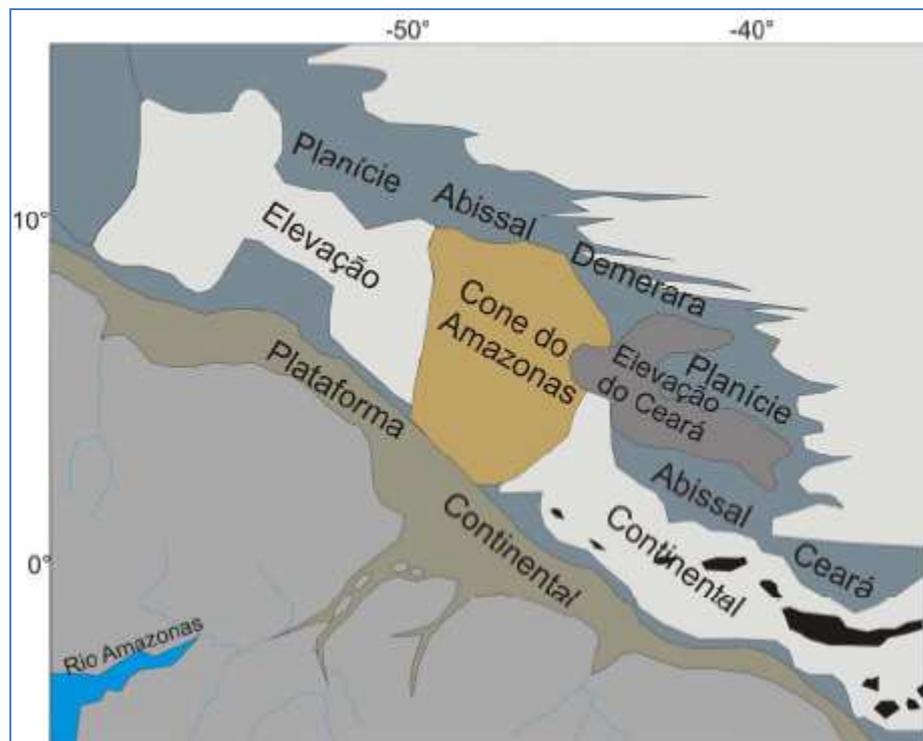


Figura 1.1: Mapa de localização do Cone do Amazonas dentro províncias morfoestruturais. Modificado de (Oliveira, 2005).

## 1.2 Estruturação do Arcabouço Tectônico

A gênese da Bacia da Foz do Amazonas está intimamente atrelada a alguns dos processos que culminaram na formação da Margem Atlântica Equatorial cujos mecanismos dominantes são complexos, e conseqüentemente geraram bacias sedimentares complexas (Matos, 1999).

Na Margem Equatorial Brasileira existem 5 bacias sedimentares, citadas de oeste para leste: Bacia da Foz do Amazonas, Bacia Pará-Maranhão, Bacia Barreirinhas, Bacia do Ceará, Bacia Potiguar (figura 1.2).

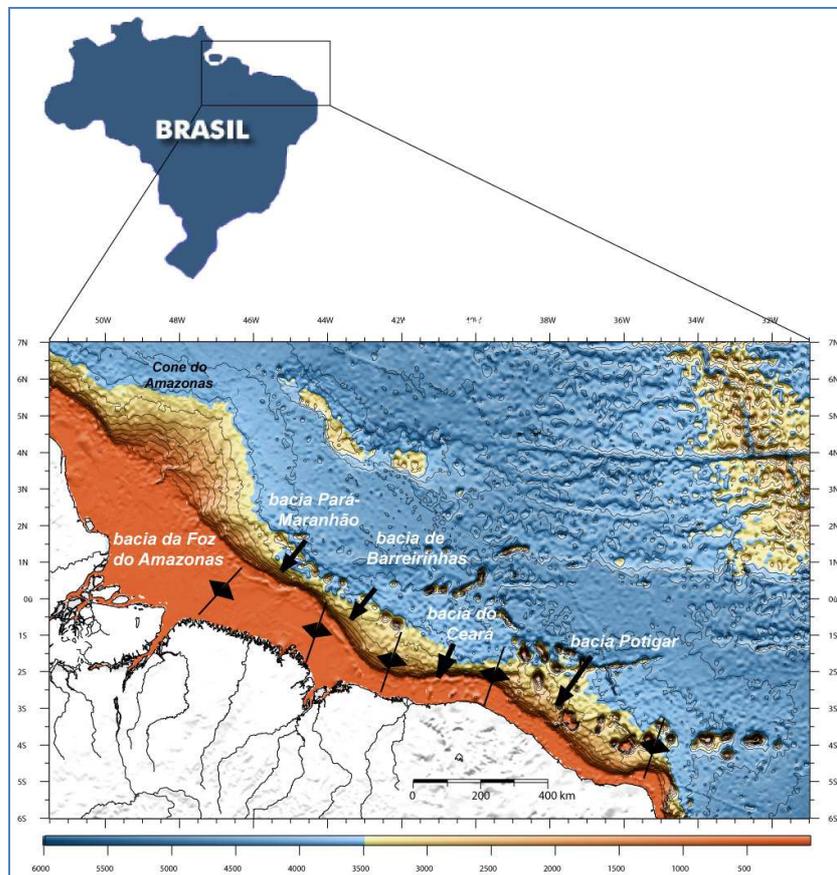


Figura 1.2: Mapa de batimetria predita com localização das bacias marginais da margem equatorial brasileira. Retirado de (Smith e Sandwell, 1994).

Segundo Matos (1999), os modelos de rifteamento simples e seus desdobramentos conceituais parecem não ser suficientes para o entendimento geológico do Atlântico Equatorial. Apesar do reconhecimento das assinaturas de cisalhamento (*shearing signatures*) ao longo de toda a Margem Atlântica Equatorial, podem surgir discrepâncias entre a evolução

terral, arquitetura sedimentar, e tectônica de subsidência já que certos domínios se encontravam paleogeograficamente tangenciados por falhas transformantes ao longo de sua evolução, e se torna errática a remontagem cinemática e geométrica dos *riftes* em algumas bacias do Atlântico Equatorial Sul (Matos, 1999).

Uma das consequências dessa movimentação transcorrente é a obliquidade das zonas de fratura oceânicas em relação à direção principal NW-SE da margem (Matos, 2000), além do desenvolvimento de bacias sedimentares com múltiplas fases de subsidência, culminando numa grande discrepância de processos geológicos (estruturais e estratigráficos) entre as diversas bacias marginais de águas profundas (Potiguar, Ceara, Barreirinhas, Para-Maranhão, Foz do Amazonas), e os riftes marginais abortados (aulacógenos) Graben Potiguar, Bacia Marajo (Graben Mexiana, Graben Limoeiro, Graben Gurupá); Sistema de Grabens Gurupi (São Luiz, Bragança Viseu, Ilha Nova) (Nóbrega, 2011).

A figura 1.3 ratifica que na Margem Equatorial Brasileira alguns dos setores se comportaram como margem transformante, e outros como margem passiva, nota-se que a Bacia da Foz do Amazonas se desenvolveu num setor de margem passiva.

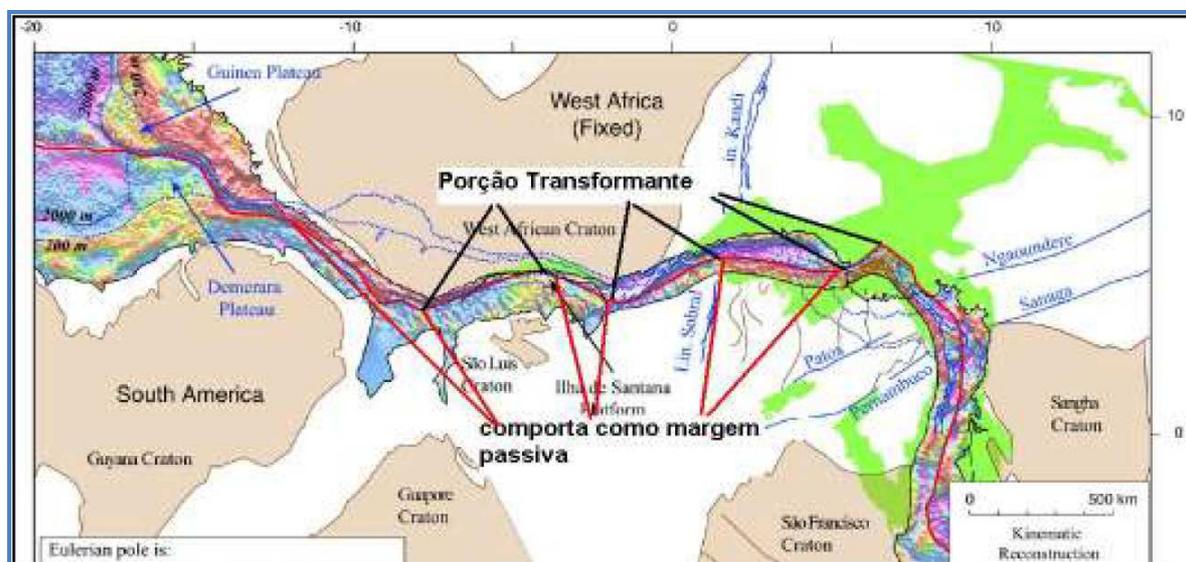


Figura 1.3: Margem Equatorial Brasileira mostrando os segmentos transformantes cisalhantes e segmentos de Margem Passiva Transformante. Retirado de (Moulin, 2010).

O histórico do tectonismo do embasamento da Bacia da Foz do Amazonas permeia todo o Mesozóico descrito por Soares Junior (2008) em três principais fases distensivas.

Na primeira fase (Meso-Triássico) o supercontinente, Pangea, experimentou em sua porção central zonas de rifteamento com magmatismo associado, e a extensão do rifteamento propiciou a separação dos grandes continentes Laurásia e Gondwana resultando na formação do Oceano Atlântico Central (OAC). Com a progressão do rifteamento para oeste foi imposta a separação entre América do Norte e América do Sul durante o Jurássico Médio, deixando como espólio a individualização da placa Norte-Americana (Soares Junior, 2008; Bizzi *et al.*, 2003).

Quando esse rifteamento passou a abranger a porção norte da Placa Sul-Americana, no ápice do magmatismo no Neotriássico, deflagrou a fragmentação da região, culminando na formação do Gráben de Calçoene, arquitetura tectônica inicial da Bacia da Foz do Amazonas, bordada por falhas normais de direção NW-SE com mergulho para NE (Soares Junior, 2008; Bizzi *et al.*, 2003).

A segunda fase começa no Eocretáceo, onde após um período de estabilidade o rifteamento reativa estruturas como o Gráben de Calçoene, permitindo diversas ampliações das mesmas, egerandouma assembleia de outras falhas normais, predominantemente orientadas NW-SE, assim como os grábens: Cassiporé na Bacia da Foz do Amazonas e o Sistema de Grábens do Gurupi, dentro deste contexto distensivo, por diferenças reológicas, algumas porções passam a se individualizar, e alguns *riftes* evoluem para bacias e sub-bacias (Bacia de Marajó, Sub-Bacia de Mexiana, Sub-Bacia de Mocajuba e Limoeiro). Ainda nessa fase diversos compartimentos do terreno (America do Sul) se alternam em soerguimento por afinamento crustal e múltiplas fases de subsidências (Nobrega, 2011), hora expondo setores antigos e estruturados a processos de erosão, e hora aprofundando o depocentros.

O fim da segunda fase (Aptiano tardio) é marcado pelo desenvolvimento de falhas normais, agora com orientação N-S, que passam a conectar diversas bacias e o sistema de Grabens do Gurupi, e também pela acirrada subsidência em algumas dessas bacias, a exemplo da Bacia da Foz do Amazonas, Bacia do Marajó e Sub-bacia de Mexiana, onde o acúmulo de sedimentos alcançou profundidades superiores a 5 km. Com a proliferação de articulações entre o Sistema de Grabens do Gurupi e outras bacias através de falhas normais, se instala o regime de margem passiva com o ingresso do mar na America do Sul e a formação de falhas transformantes de direção ENE-WSW que seccionaram os antigos grábens de direção NW-SE (Azevedo, 1991).

Durante a terceira fase, no Aptiano, o desenvolvimento do Oceano Atlântico Central começa com rifteamento que segue migrando e gerando as bacias de Potiguar, Ceará, Barreirinhas e Pará-Maranhão; até ampliar a Bacia da Foz do Amazonas no Albiano.

### 1.3 Dinâmica Tectono-Sedimentar

O histórico sedimentar remonta ao Triássico com o preenchimento vulcano-sedimentar do Graben Calçoene, compondo assim a Formação Calçoene. Essa formação possui basaltos e diques de diabásio com alternados com pacotes de arenitos finos a médios. Os dados sísmicos mostram uma discordância na base do contato desta formação com o embasamento (Paleozóico) e no contato superior com a Formação Cassiporé, além de discordâncias no contato com blocos rotacionados das formações Limoeiro, Marajó e Amapá. Os pacotes clásticos são avermelhados, atribuídos a um clima árido, característico de bacias Triássicas, e por constituírem fácies fluvio-eólico-lacustres, lhes é atribuído um sistema deposicional desértico (Brandão & Feijó, 1994).

Na Formação Cassiporé verifica-se uma alternância entre folhelhos cinzas, arenitos cinzas de granulação fina a muito fina e arenitos finos a médios. Durante a revisão da carta estratigráfica proposta por Figueiredo *et al.* (2007), essa formação está subdividida em duas fases de rifteamento entremeadas por uma outra fase associada aos depósitos da formação (Formação Codó). Os pacotes sedimentares desta formação são estimados em até 5,5 km, e estão atrelados a preenchimento na fase sin-tectônica de hemigrabens associados a reativações dos primeiros *riftes* da bacia.

Sobreposta a Formação Cassiporé se encontra uma formação semelhante, nomeada de Formação Codó, que é constituída de folhelhos e calcilutitos, essa formação é tida como marcação do topo de sequências *rifte*, conforme foi definido por Figueiredo *et al.*, 2007.

O final do Albiano marca o término da fase *rifte*, e então se inicia a fase *drifte* (Albiano tardio), decomposta por Figueiredo *et al.*, 2007 em 11 sequências responsáveis pela composição de 7 formações, as primeiras cinco sequências perfazem a Formação Limoeiro, sendo as três primeiras sequências (k70, k82-k86, k88-k90) consideradas regressivas e as últimas duas transgressivas (k100-k120, k130-E20). A base dessa formação possui uma discordância no contato inferior (Formação Cassiporé) associada ao *Break Up* continental. As primeiras três sequências representam momentos distintos de regressão marinha na

bacia desde o seu afogamento na primeira sequência, e então passam a prevalecer os folhelhos e siltitos sobre os arenitos, denotando fontes sedimentares distantes em direção ao continente.

Já nas últimas sequências, sendo os hiatos deposicionais entre elas bem correlacionados com as curvas de queda do nível do mar, o caráter deposicional é transgressivo, tendo o arenito como principal litologia, até o momento onde se inicia a propagação de uma plataforma carbonática.

A Formação Amapá é dada por uma complexidade deposicional visto que numa primeira sequência (E30-E50) a deposição carbonática em atuação desde o Eoceno passa a ser parcialmente inibida pela chegada de siliciclásticos que se tornam intermitentes aos carbonatos até o Mioceno Médio, mas essa deposição ocorre de forma desigual pela bacia, de maneira que no setor sudeste houve uma sedimentação mista carbonático/siliciclástica, enquanto o setor noroeste experimentou uma sedimentação proximal francamente carbonática (Figueiredo *et al.*, 2007). Mais duas sequências (E80-N10, N20-N30) são associadas à essa formação, com o mesmo padrão de preenchimento, porém, são datadas como Miocénicas. Interdigitada lateralmente com Forma Amapá e Travosas, está a Formação Marajó, composta por arenitos finos a grossos. Rumo ao eixo da bacia observa-se a sedimentação regressiva onde ocorrem os sedimentos pelágicos distais da Formação Travosas (Bizzi *et al.*, 2003).

Com o início da regressão que veio se instalando desde o Mioceno Médio até o presente, se encontram as formações Tucunaré, Pirarucu e Orange. No domínio mais próximo da plataforma atual se localiza a Formação Tucunaré, composta por areia grossa, agradando para uma intercalação entre areia fina e grossa a medida em que interdigita-se lateralmente com a Formação Pirarucu, nas mediações da quebra da plataforma (Brandão e Feijó, 1994).

A Formação Pirarucu possui areia fina e argilitos cinzas, e grada lateralmente para a Formação Tucunaré, em direção à costa assim como grada também para a Formação Orange, mais a offshore (Brandão e Feijó, 1994).

A formação mais recente (Formação Orange) contém os pacotes sedimentares congregados pelo Cone do Amazonas, depositados no extremo offshore da bacia, e caracterizados por uma expressiva sedimentação pelágica com quilômetros de folhelhos, argilitos e siltitos. Seu ambiente deposicional associado é marinho profundo (batial), além de lentes de arenitos finos depositados por correntes de turbidez que estão registradas na porção distal da bacia desde o Albiano, como forma de eventos esporádicos (figura 1.4) (Brandão e Feijó, 1994).



#### 1.4 Gênese e Evolução do Cone do Amazonas

O Cone do Amazonas constitui uma das entidades geomorfológicas mais imponentes na Margem Equatorial Brasileira de maneira que despertou o interesse de diversos autores (Damuth & Kumar, 1975; Flood, 1995; Normark, 1997; Grossmann, 2002; Torres, et. al., 2003) desde a década de 70 até os dias atuais. A gênese dessa feição atualmente é associada por alguns autores (Damuth & Kumar, 1975; Figueiredo, 2009) como sendo um efeito de alguma(s) fase(s) do soerguimento Andino que teria(m) invertido o fluxo da rede de drenagem do Pacífico para o Atlântico, favorecendo a acumulação de sedimentos junto da plataforma continental e até mesmo talude abaixo, abarcando tanto sedimentos terrígenos quanto marinhos (pelágicos) desde o Mioceno Médio.

Durante a progradação do cone os diversos eventos geotectônicos concernentes a Placa Sul-Americana e suas adjacências influenciaram tanto as taxas de sedimentação (0,05 m/Ka a 1.22 m/Ka) quanto as fontes (Craton do Amazonas, terraços Proterozoicos e fases de soerguimento Andino) sedimentares contribuintes para a formação da morfologia atual (Figueiredo, 2009).

A terminologia de cone foi atribuída por autores (Ewing *et. al.*, 1958 *apud* Damuth & Kumar, 1975) que estudavam áreas adjacentes a desembocadura de rios que geravam grandes espessuras de acumulação sedimentar submarina com formato de leque. Na batimetria é possível reconhecer um cone por uma sequência de isolinhas com cotas decrescentes e de convexidade progressivamente abaulada em direção a *offshore* conforme ilustrado na figura 1.5.

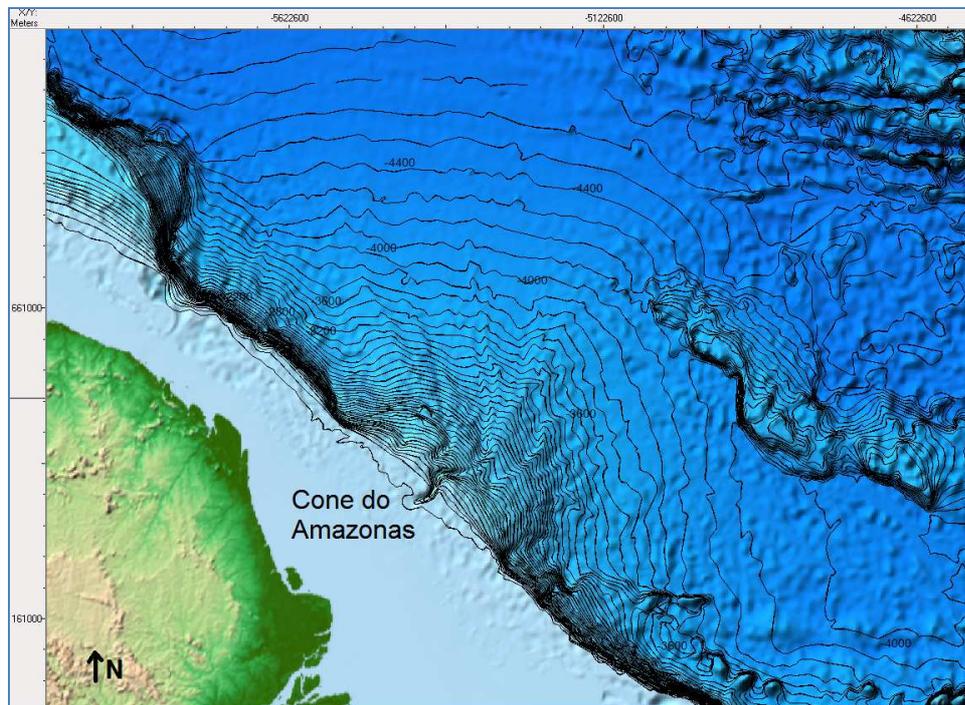


Figura 1.5: Mapa batimétrico obtido com dados do LEPLAC denotando a morfologia e a abrangência do Cone do Amazonas, as linhas estão espaçadas em cotas de 100 metros. Retirado de (LEPLAC FASE 1).

Na plataforma continental a extensão do cone abrange 380 km de extensão, chegando a 600 km em sua base, no perfil longitudinal os seus gradientes variam de 1:150 a 1:200. Admite-se pelo menos três subdivisões para o Cone do Amazonas: cone superior, cone médio e cone inferior. No cone superior domina o caráter de superfície acidentada com um cânion central bem definido que segue de forma incisiva para o cone médio, a superfície do cone médio apresenta uma convexidade ascendente de padrão *hummocky*, e nessa área o cânion central passa a se ramificar em diversos outros canais distributários (Damuth, 1982). O Cone Inferior possui uma superfície muito mais suave em termos de gradiente e é recortada ainda por assembleias de pequenos canais, porém, sem sinal de sistemas de *channel-levees*.

Sobre a disposição do sistema de canais se faz mister discorrer em primeiro lugar sobre um cânion central que se prolifera ante os outros desde a plataforma continental na isobata de 50 metros até a isobata de 1.500 metros onde passa a dar origem aos mesmos a partir do Cone Médio até o Cone Inferior. O cânion central do Amazonas promove uma incisão intensa em formato similar a um “V” com um relevo relativo de mais de 500 metros na plataforma continental, cortando o cone superior e médio ao meio, e decaindo para algo

entre 150 e 250 metros de relevo relativo no domínio do cone médio (Damuth & Kumar, 1975). Nessa porção encontra-se um sistema de *channel-levees* irradiados a partir do cânion central que se empilham, sobrepondo-se ou que confluem lateralmente, de maneira que alguns grupos decanais são tão próximos uns dos outros que sugerem um padrão entrelaçado médio (Damuth, Kumar, 1975).

À luz de dados sísmicos, Damuth (2002) interpretou uma grande arquitetura sedimentar ao longo do cone superior e médio que é composta basicamente por depósitos inferidos por características sismoestratigráficas tais como os *HARs* (*High-Amplitude Reflections*) e os *HARPs* (*High-Amplitude Reflections Packets*), que viabilizaram a concatenação de diversos processos e a associação a suas unidades deposicionais num modelo plausível.

Pelos perfis sísmicos os canais apresentam padrão altamente meandrante com agradaciao vertical e lateral em sistema de *channel-levees*, nesse contexto uma unidade (*HARs*) é identificada na sísmica, imediatamente no eixo do canal e interpretada como agradaciao de sedimentos grossos de preenchimento de calha de canal. Com uma grandeconsistência lateral e constituindo uma unidade basal que pavimenta os depósitos de *channel-levees*, os *HARPs* são interpretados como sedimentos bastante grossos depositados por fluxos de espalhamento lateral-radial na desembocadura do canal (lobos), ou ainda por pulsos mais fortes reincidentes que vêm a romper uma das ombreiras laterais do canal, e extravasam lateralmente; e se justaponto a tudo isso acontecem esporádicos episódios de sedimentação por movimentos de massa devido à instabilidade imposta pelo gradiente e outros fatores (Figuras 1.6 e 1.7).

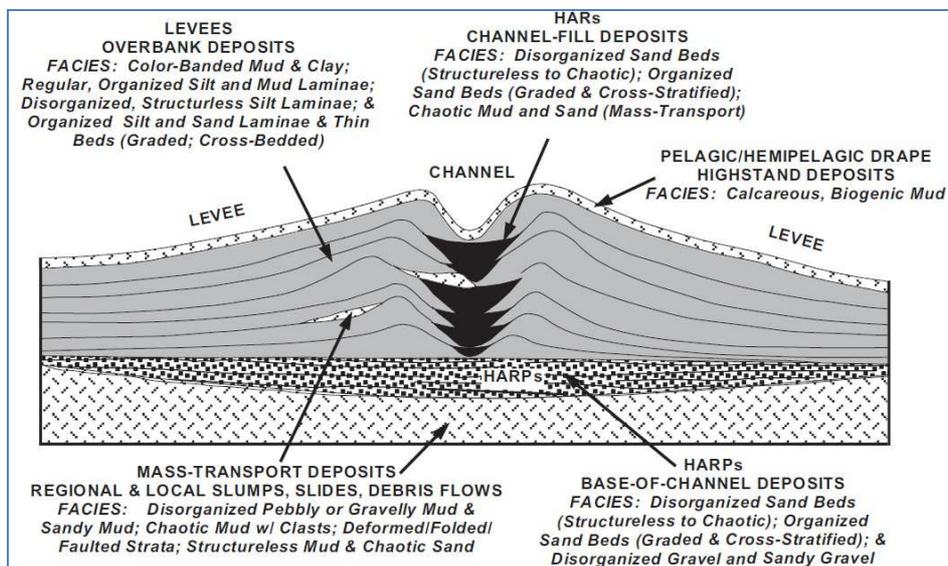


Figura 1.6: Modelo de distribuição de fácies e unidades sísmicas numa arquitetura sedimentar de sistema channel-levees no Cone do Amazonas. Retirado de (Damuth, 2002)

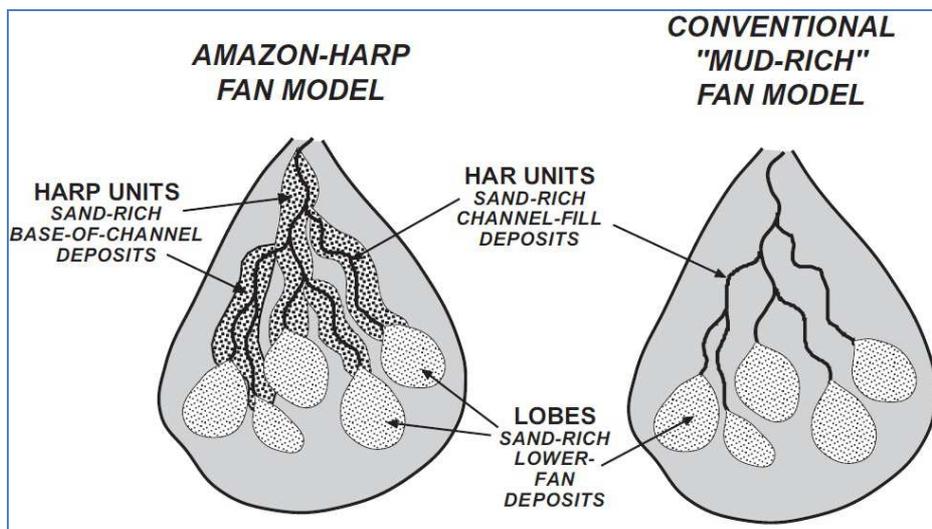


Figura 1.7: Diagrama esquemático em planta mostrando a proliferação espacial do sistema de channel-levees e a propostade dois modelos de Cones. Retirado de (Damuth, 2002).

Outros processos sedimentares relevantes para a construção sedimentar do cone são os depósitos de movimentos de massa, que são recorrentes nessa região desde o limite Cretáceo Superior - Cenozoico e abrangem áreas da ordem de 10.000 km<sup>2</sup> com pacotes individuais de até 1.000 metros de espessura, congregando volumes da ordem de 10<sup>3</sup> de km<sup>3</sup> (Piper *et al.*, 1997, Araújo, 2009; Reis *et al.* 2007). Esses depósitos de movimentos de massa (MTDs)

podem possuir causas diversas, e embora alguns autores (Piper *et al.*, 1997) tenham atribuído apenas o gradiente e à sublimação de hidratos de gás como agente de disparo desses processos, trabalhos mais recentes (Araújo *et al.*, 2009) mostram uma íntima relação entre MTDs e a tectônica gravitacional, de maneira que estes depósitos estão localizados a frente de cinturões compressivos (figura 1.8), e são resultantes do colapso gravitacional das sequências progradacionais do cone. Esses cinturões propiciam a formação de escarpas de falhas e deformações do fundo marinho por propagação de falhas, que conseqüentemente ficam sujeitos a colapsos, gerando MTDs, alguns de baixa magnitude (200-300 metros de espessura), por vezes com um padrão interno altamente desestruturado e caótico, imprimindo sismicamente um caráter difuso interpretado como *debrisflows*, e outros de grande magnitude, nomeados de megadeslizamentos (até 1.000 metros de espessura) associados ao aumento da pressão intersticial de fluidos concomitantemente com a instabilidade natural imposta por altos gradientes.

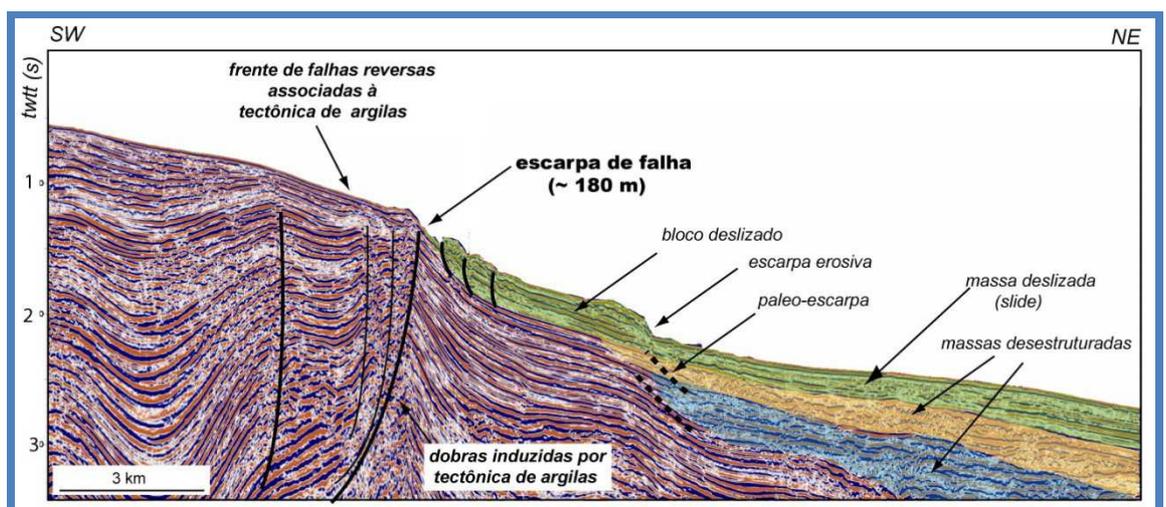


Figura 1.8: Seção Sísmica interpretada mostrando feições compressivas do tectonismo gravitacional e os movimentos de massa associados a elas. Retirado de (Pederneiraset al., 2008).

## 2. Metodologia e Dados Utilizados

Os dados do presente trabalho consistem em perfis de sísmica de reflexão *pós-stack time migration* (PSTM), e dados de batimetria para geração de mapas que localizassem geograficamente as linhas sísmicas. Essas linhas sísmicas foram adquiridas pela Marinha do

Brasil para o projeto LEPLAC e constituem um subconjunto de diversos levantamentos diferentes situados na Bacia da Foz do Amazonas e adjacências.

A metodologia teve como base a interpretação de características sísmicas que estão relacionadas à presença de hidratos de gás como o BSR e o blanking. Depois disso foi feita uma análise e uma identificação dos atributos sísmicos que melhor caracterizam os hidratos. O software SMT Kingdom foi utilizado para a interpretação e mapeamento dos horizontes, aplicação de atributos sísmicos, análise de espectro dos dados, além da delimitação de polígonos de ocorrência dos hidratos de gás na região do Cone do Amazonas.

Os mapas batimétricos regionais deram suporte para visualização e melhor associação entre a morfologia e as estruturas mapeadas nos perfis sísmicos afim de situá-las num contexto tectônico que exerce grande controle sobre a ocorrência de hidratos na região. O mapa batimétrico da margem continental brasileira foi usado para situar a Bacia da Foz do Amazonas em um contexto regional, e teve como base geral de dados do ETOPO, e foi novamente regridado somente para a região da bacia por dados de batimetria por navio com melhor resolução provenientes do projeto LEPLAC da Marinha do Brasil. Todos os horizontes foram mapeados no SMT Kingdom e exportados em coordenadas X, Y (em metros) e de Z em Tempo duplo (TWTT).

Apesar do conjunto de linhas sísmicas possuir ambas orientações *dip* e *strike*, somente foram encontrados hidratos em linhas *dip*, estando duas delas situadas no setor Noroeste e apenas uma no setor Sudeste do Cone do Amazonas (figura 2.1).

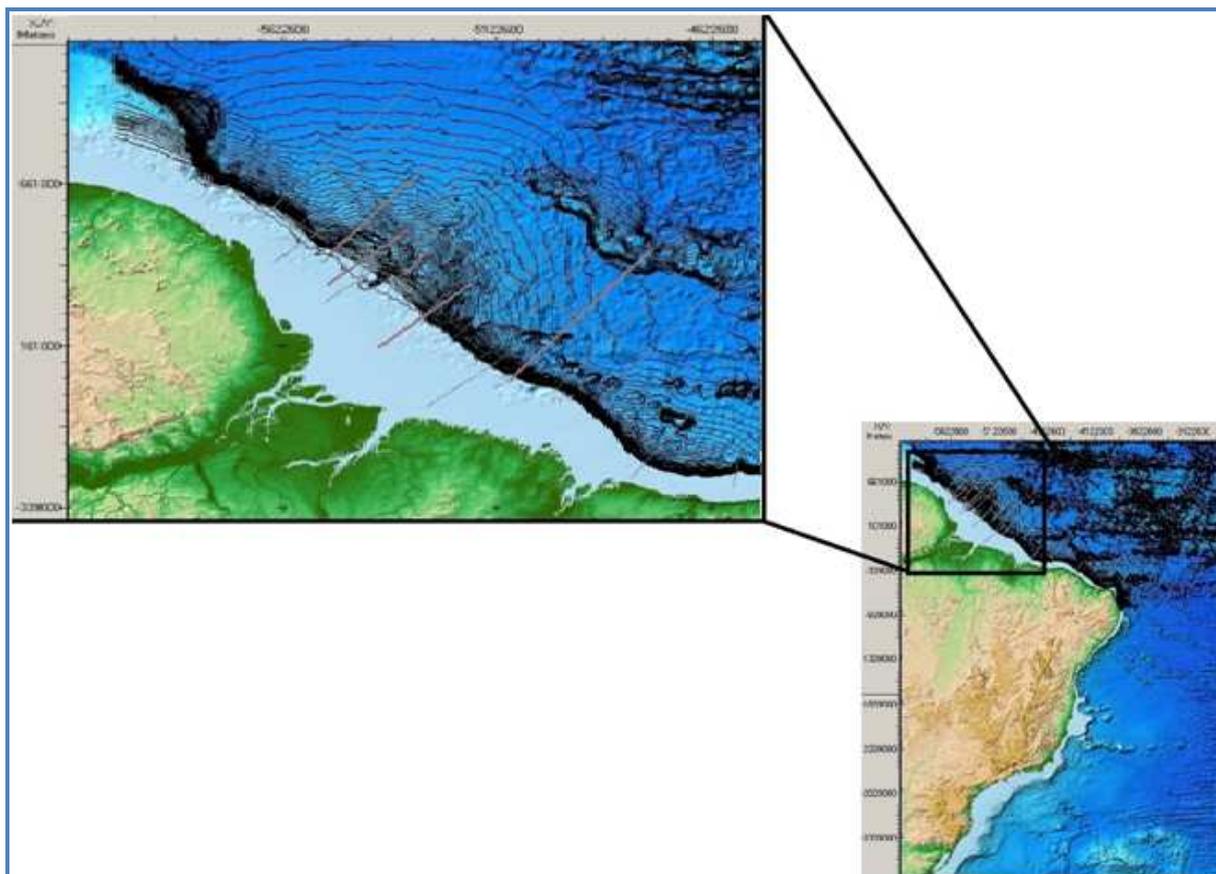


Figura 2.1: Localização das linhas analisadas na área de estudo. Retirado de (LEPLAC-FASE 1)

### 3. Hidratos de Gás

#### 3.1. Definição e Propriedades

Os hidratos de gás (HGs) são uma classe particular dos clatratos, que são "misturas", onde uma molécula pequena ou grande, como metano ( $\text{CH}_4$ ), xenônio, óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ficam presos em cavidades de cristais quando a solução é suficientemente resfriada e um dos componentes se cristaliza (Brown, 1962).

Quimicamente os HGs são sólidos cristalinos formados por 15% de gás natural (hidrocarbonetos gasosos leves, principalmente metano) e 85% de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), as moléculas de água são ligadas por pontes de hidrogênio, e funcionam como cavidades (poliedros convexos) de aprisionamento para o gás (Tomasini *et al.*, 2011, Baptista, 2007).

A geometria das moléculas de HGs varia de acordo com as condições físicas, assumindo a forma hexagonal a  $0^\circ\text{C}$  em CNTP, passando à isométrica (cúbica), no caso dos cristais de gelo, e tornando-se cada vez mais complexa com o aumento da pressão. O tipo e a quantidade de gás disponível no ambiente também podem modificar a estrutura molecular dos HGs (Thakur, 2011). Segundo Thakur, 2011 há três Tipos de estruturas moleculares (I, II, H) bem estudadas de HGs encontrados na natureza, enquanto que macroscopicamente os HGs têm a mesma aparência do gelo (figura 3.1 (a)). O Tipo I (figura 3.1 (b) e (c)) e o Tipo II e H (figura 3.1 (b)) se diferenciam pelo formato e pelo tamanho de suas cavidades, que, conseqüentemente, poderão abrigar moléculas maiores ou menores, sendo o tamanho dessas moléculas um efeito da própria origem do gás. As moléculas maiores ficam hospedadas no Tipo II, que em geral está associado ao gás de origem termogênica, enquanto o Tipo I, mais puro e com peso molecular menor, está associado à origem biogênica (Tanaka, 2003; Kvenvolden, 1993).

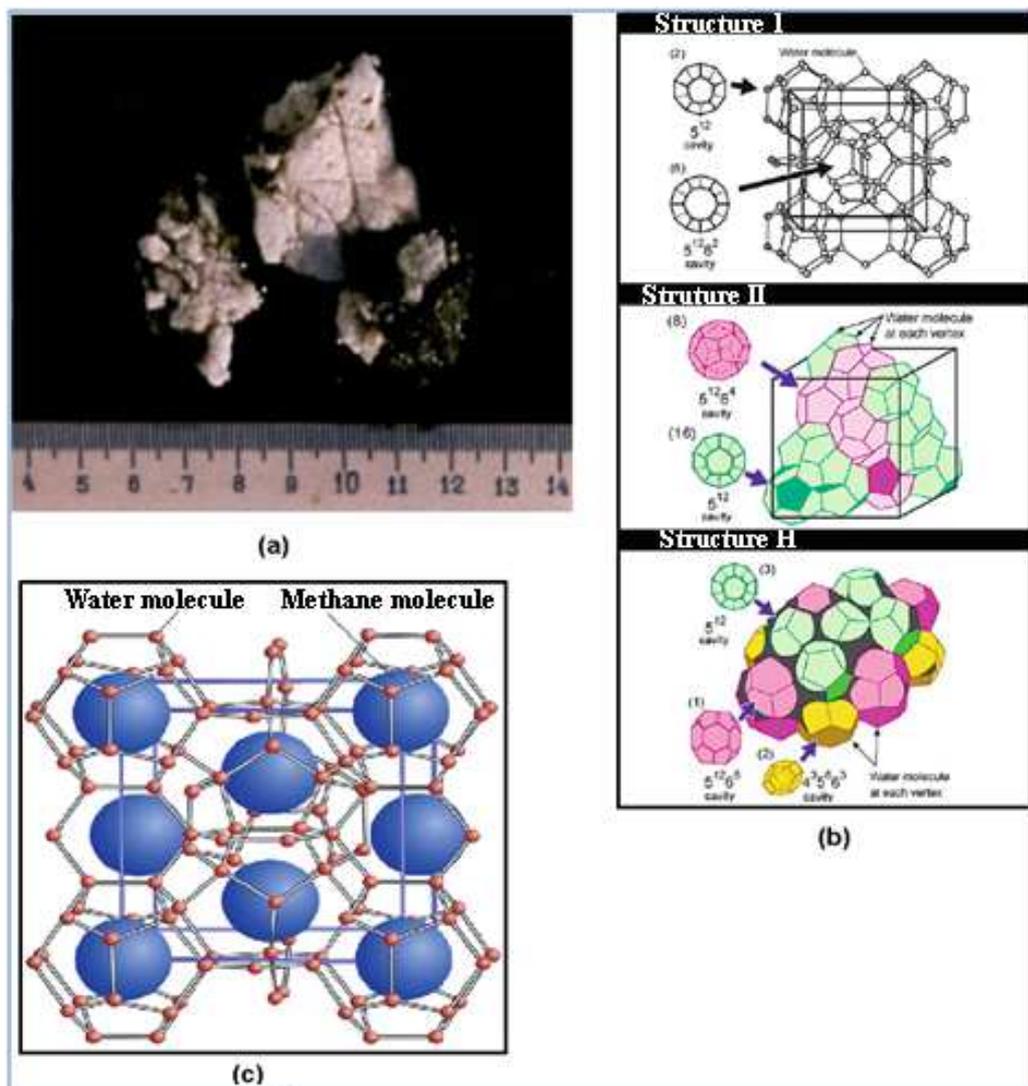


Figura 3.1: (a) Representa o HG como é visto a olho nu, semelhante ao gelo (adaptado de Clennell, 2000); (b) Três possíveis estruturas moleculares do HG, a Tipo I possui a forma para compostos gasosos mais leves, a Tipo II e Tipo III comportam moléculas de hidrocarbonetos maiores (modificado de Thakur, 2011); (c) Forma molecular mais comum do HG, aprisionamento de metano. Modificado de (Thakur, 2011).

A tabela (a) da figura 3.2 sintetiza a relação entre as principais estruturas cristalinas em associação com seus respectivos compostos e na tabela (b) há uma relação de gases e seus potenciais energéticos onde se destaca o maior calor de combustão por grama (kJ/g), gerado pelo metano (Tanaka 2003; Freitas, 1990).

Sistema Cristalográfico da Molécula de Gelo: Isométrico (Cúbico)					
Tipo I		Estrutura		Tipo II	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• A molécula de gás encontra-se alojada no centro da estrutura</li> <li>• Principais Compostos: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Metano</li> <li>- Etano</li> <li>- Dióxido de carbono</li> <li>- Sulfeto de hidrogênio</li> </ul> </li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esta estrutura consegue alojar moléculas maiores</li> <li>• Principais compostos: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Propano</li> <li>- Isobutano</li> <li>- Nbutano</li> </ul> </li> </ul> <p>Obs: os dois primeiros podem ser encontrados sob forma de hidratos puros.</p>	
(a)					
Hidrocarboneto		KJ/mol	kJ/g	KJ/ml	% H
Nome	Fórmula				
Metano	C H <sub>4</sub>	885.78	55.19	23.39	25.1
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1547.28	51.41	28.06	20.1
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2210.46	50.15	29.19	18.3
Isobutano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2870.28	49.39	28.60	17.3
(b)					

Figura 3.2: Tabela (a) - mostra típicas estruturas naturais de cristais de HG e seus respectivos compostos associados (Freitas 1990). Tabela (b) - Mostra a série de n-alcenos com menos de 5 átomos de carbono e seus valores de combustão. O metano como gás de maior valor de combustão por grama (kJ/g) indica que para um dado volume fixo de gás a energia liberada por ele é maior do que a dos outros. Retirado de (Tanaka, 2003)

A molécula mais comum aprisionada nos HGs dos sedimentos marinhos é o metano (CH<sub>4</sub>), mas outras moléculas (Ex: C<sub>2+</sub>, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>) também podem ser encontradas ainda que em menor proporção (<2%), de qualquer forma, esses outros compostos propiciam o aumento da temperatura de dissociação dos HGs conforme mostra o gráfico da figura 3.3 (b) (Machado, 2009, Tanaka, 2003, Kvenvolden, 1993, Freire, 2012). Além disso, os diversos tipos de sais em solução nas águas oceânicas também fragilizam a estabilidade dos HGs (figura 3.3 b), isso explica o porquê de terem uma natureza tão efêmera e de difícil amostragem direta em testemunhos (Kvenvolden, 1993 apud Barros, 2009).

Em termos de fase física a tabela na figura 3.3 (a) mostra que os HGs se assemelham ao gelo em alguns parâmetros como densidade, módulo de incompressibilidade e módulo de cisalhamento, parâmetros esses que influenciam as ondas sísmicas.

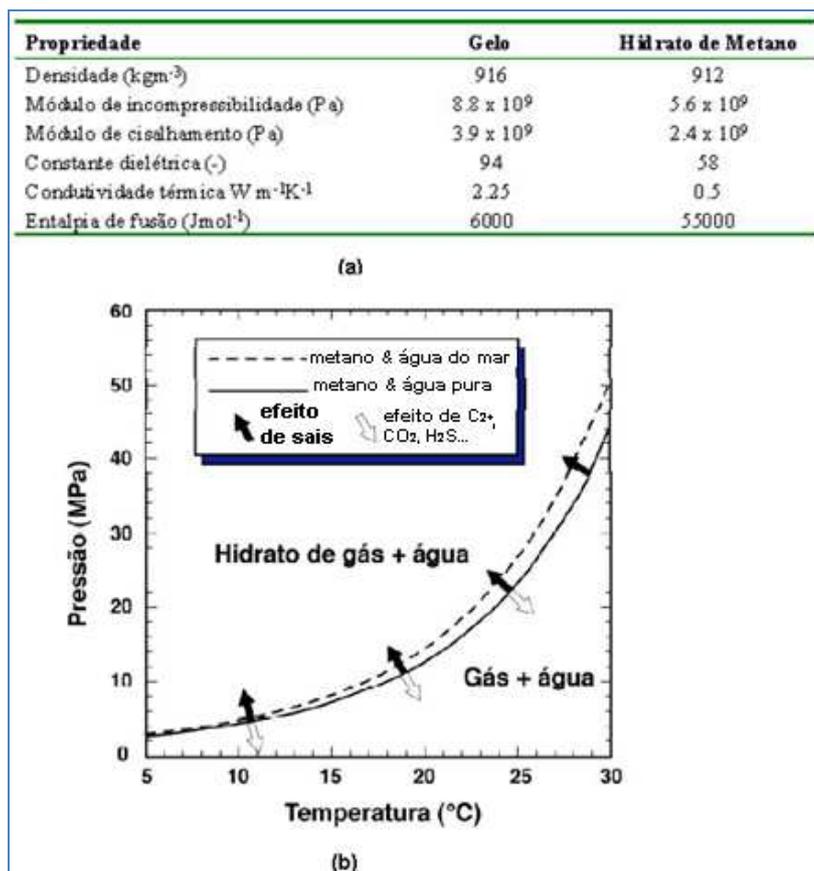


Figura 3.3: (a) Propriedades físicas dos HGs; (b) Ábaco de temperatura e pressão indicando a linha de estabilidade para HGs com metano e sua tendência à instabilidade conforme a proporção de outras moléculas mais ou menos pesadas junto ao composto. Modificado de (Clennell, 2000).

O interesse nos hidratos enquanto fonte de energia tem aumentado cada vez mais visto que a tecnologia atual está cada vez mais próxima de tornar a sua exploração viável. Com base em amostras de testemunhos e técnicas geofísicas que permitem mapear grandes áreas, estima-se que os hidratos em subsuperfície retém entre 500 e 10.000 Gt de carbono retido em plataformas continentais, talude e elevação continental; e uma quantidade menor para os ambientes *permafrost*, cerca de 4.000 Gt, sendo 400 Gt só no Ártico (Thakur, 2011, Maslin, 2010). Quando comparado a outras fontes de energia os HGs são mais interessantes por conterem uma imensa quantidade de carbono, num volume relativamente pequeno, já que  $1\text{m}^3$  de HG contém  $164\text{m}^3$  de metano e  $0.8\text{m}^3$  de água em CNTP conforme ilustra a figura 3.4 (Freire, 2012, Melo, 2009).

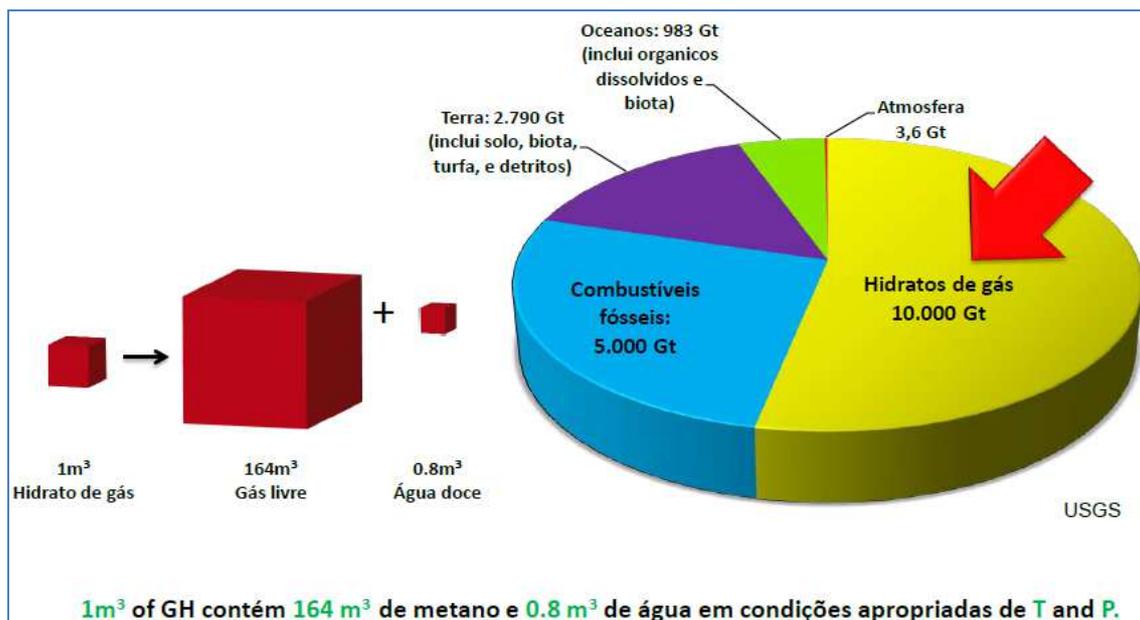


Figura 3.4: O Gráfico ilustra as proporções de carbono em diferentes tipos de fontes combustíveis. Retirado de (Freire, 2012)

### 3.2. Ambientes de HGs e sua Distribuição

Em ambientes naturais os hidratos são abrigados pelos poros intersticiais dos sedimentos, preferencialmente de granulometria fina, sempre em condição termobárica de alta pressão e baixa temperatura, e nas margens continentais em profundidades de pelo menos 500 metros, ou mesmo no continente em ambientes gélidos (*permafrost*) como a região Ártica (Clennell, 2000, Tomasini, 2011). A formação dos hidratos é linearmente dependente da pressão e exponencialmente dependente da temperatura, esta formação também se dá em função de uma quantidade suficiente de metano, e todo ambiente que oferecer essas condições deverá abrigá-los em seus estratos sedimentares (Pintas, 2011, Thakur, 2011). A figura 3.5 mostra em um mapa global a localização dos pontos de testemunhagem com identificação direta (pontos amarelos) ou indireta (pontos vermelhos) de HGs no globo, nota-se que o número de HGs inferidos (pontos vermelhos) é muito maior que os diretamente amostrados (pontos amarelos), dado o efeito da sua natureza altamente instável.

Outro aspecto importante a ser notado é a distribuição das ocorrências de hidratos pelo globo, a figura 3.5 mostra que eles são mais frequentemente encontrados em regiões oceânicas, seja na plataforma continental, talude ou elevação continental (Tanaka, 2003), e

quando estão no continente se restringem a zonas de alta latitude sob horizontes de solo congelado (*permafrost environments*) (Barros, 2009).

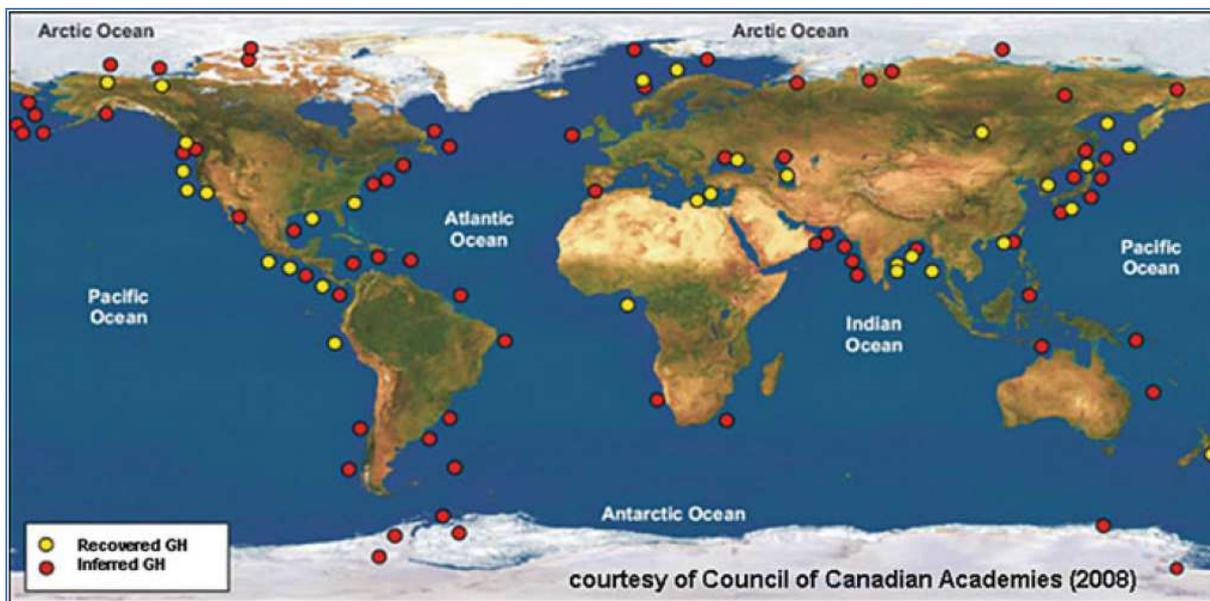


Figura 3.5: Mapa com todos os testemunhos ao redor do globo que indicaram presença direta ou inferida de HGs. Retirado de (Thakur, 2011).

Em termos gerais somente os ambientes *permafrost* estabelecem condições para a formação de HGs em terra (*onshore*), na verdade, acredita-se que no Ártico as condições termais favoráveis existam desde o fim do Plioceno (~1.88 Ma). Modelagens térmicas indicam que foi possível criar condições favoráveis para a formação de HGs, até mesmo na plataforma continental do Ártico, pois durante os períodos glaciais as porções que hoje estão a uma profundidade de 120 metros estiveram expostas, essas porções estão dentro das seguintes regiões: Alaska, mar de Mackenzie Delta-Beaufort, Bacia Sverdrup no Canadá; e em quatro províncias fisiográficas na Rússia: West Siberian Basin, Lena-Tunguska, Timan-Pechora (Max, 2003). Muito embora só se tenha identificado diretamente HGs no mar Mackenzie Delta-Beaufort e no Alaska foi feito um mapa de distribuição de HGs (figura 3.6) em áreas favoráveis segundo modelagens balizadas por dois fatores: zonas de gradiente geotérmico e composição do gás, os outros fatores são mais difíceis de quantificar (Max, 2003).

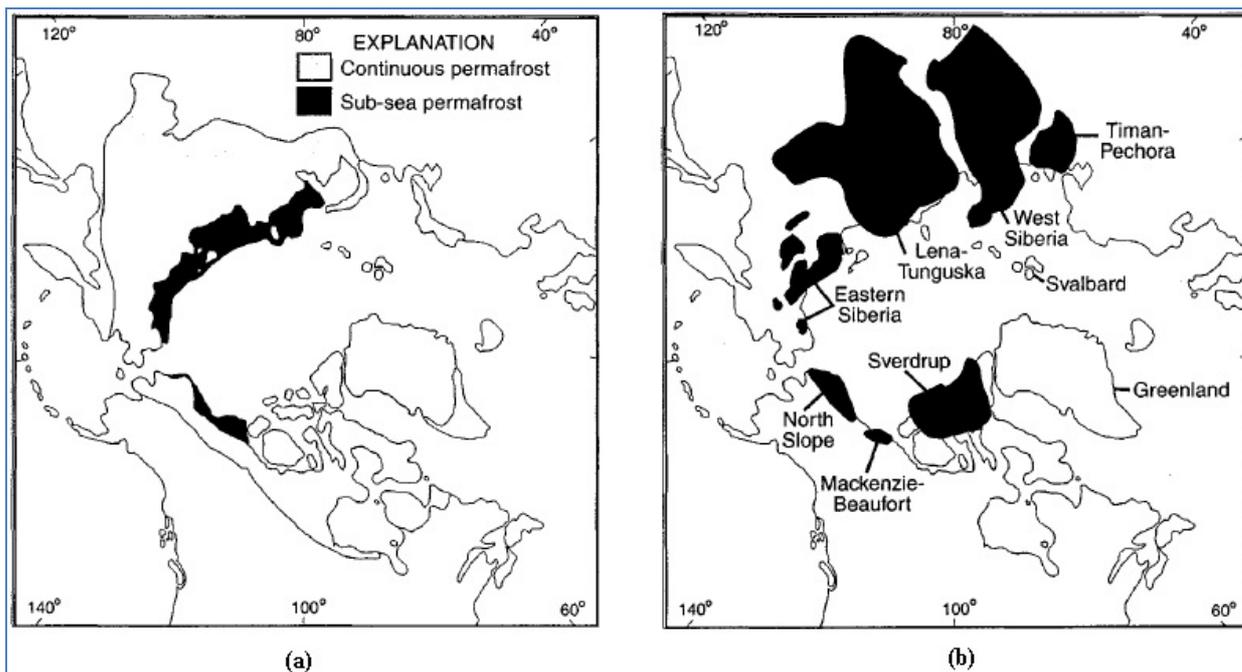


Figura 3.6: (a) Distribuição de Permafrost no Hemisfério Norte, (b) Localização das Bacias Sedimentares do Hemisfério Norte e as respectivas áreas (preenchidas de preto) com potencial contingente de Hidratos de Gás. Modificado de (Max, 2003).

No Brasil já foram identificadas pelo menos duas importantes áreas de ocorrência através de dados sísmicos: Cone do Rio Grande (Fontana, 1989; Fontana e Mussumeci, 1994; Barros, 2009) e Cone do Amazonas (Manley Flood, 1988; Sad *et al.*, 1997; Sad *et al.*, 1988), em ambas as regiões os HGs ocorrem no talude e elevação continental (Barros, 2009; Tanaka, 2003). E na bacia de Campos as observações indiretas concernentes à dificuldade de fixação de plataformas petrolíferas fizeram os autores Fontana e Mussumeci (1994) considerarem a possibilidade da ocorrência de HGs (figura 3.7).

No Cone do Rio Grande a área onde os hidratos estão pode chegar a 50.000 km<sup>2</sup>, com uma lâmina d'água de 500 a 3.500 m e apresentam uma média de 600 m, enquanto que no Cone do Amazonas eles estão restritos a uma área de 28 km<sup>2</sup>, sob uma lâmina d'água de 600 a 2.800 m com uma espessura média de 450 m (Fontana, 1989; Sad *et al.*, 1998, Tanaka, 2003). O trabalho pioneiro de Manley e Flood (1988) identificou em perfis sísmicos de alta resolução (figura 3.8) a presença de uma forte reflexão sobreposta às reflexões de acamamentos sedimentares pré-estruturados, nesse caso o BSR se encontrava em locais com cotas batimétricas inferiores a 2.000 m (Flood, *et al.*, 1997).

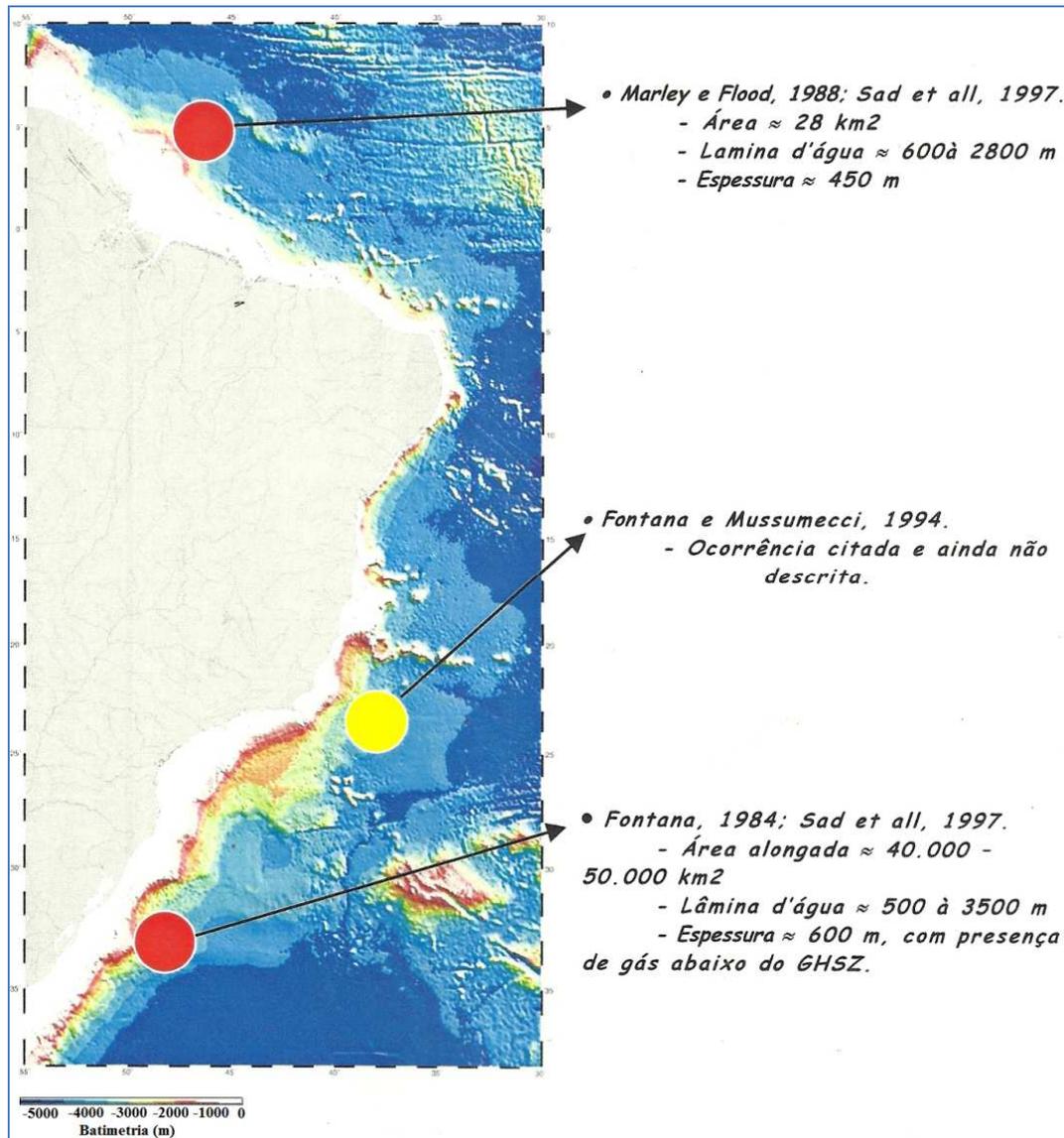


Figura 3.7: Ocorrências de Hidratos de Gás na Margem Continental Brasileira. Os pontos vermelhos indicam as ocorrências identificadas por linhas sísmicas, o ponto amarelo indica uma possível ocorrência citada na literatura. Retirado de (Tanaka, 2003).

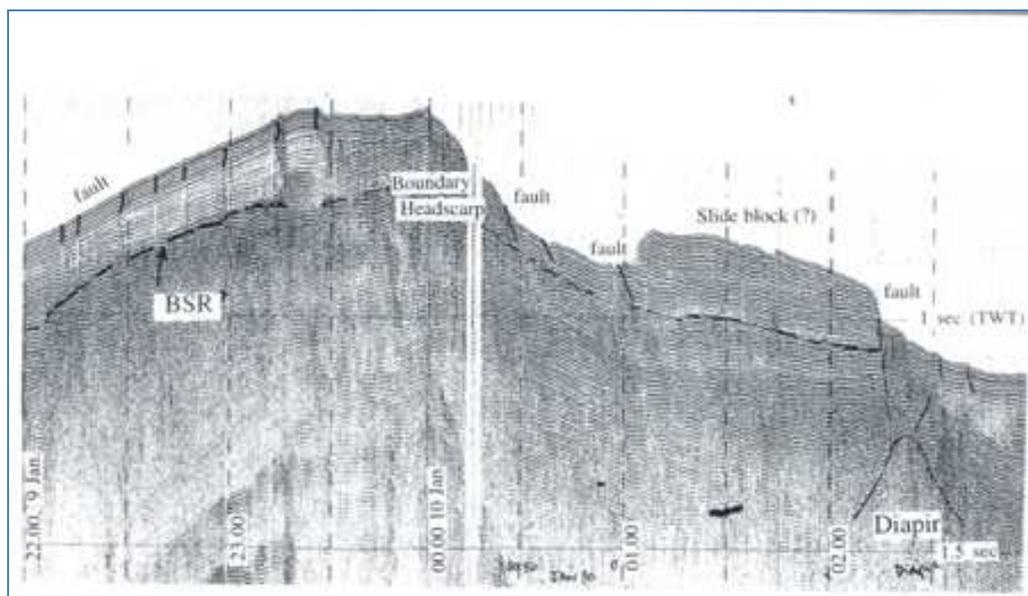


Figura 3.8: Perfil sísmico de alta resolução mostrando o BSR interpretado adjacente a um depósito de movimento massa no Cone do Amazonas. Retirado de (Flood *et al.*, 1997).

### 3.3. A Origem dos HGs

Assumindo que a maior parte dos HGs é composta por metano, importa agora compreender a possível origem desse metano para enquadrá-lo num modelo fenomenológico que seja geologicamente plausível. Antigamente acreditava-se que o metano disponível para formar os HGs tivesse sempre uma fonte biogênica, mas a evolução de estudos nesse ramo constatou que era possível obter gás metano através de processos termogênicos que promoveriam o craqueamento de hidrocarbonetos pesados (Tanaka, 2003; Tan, 2012).

Como já foi dito anteriormente, os HGs podem ter origem de ordem biogênica, ou seja, o metano aprisionado nos clatratos seria advindo da decomposição de matéria orgânica imatura por bactérias metanogênicas (Grupo *Archaeobacteria*) e pela ação de microorganismos anaeróbicos na zona de sulfato-redução, nessa zona rasa o oxigênio já teria sido consumido por ação bacteriana. A maior parte do metano em ambiente marinho é resultante da redução do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ou do acetato, que por ação bacteriana pode promover a saturação de gás necessária, desde que não existam sulfatos que possam interagir com eles, geralmente para isso os sedimentos devem estar soterrados a uma profundidade de no mínimo 10 metros, onde se encontra a zona anaeróbia de carbonato - redução (zona de produção de metano) conforme ilustra a figura 3.9 (Tanaka, 2003; Maslin, 2010; Clennell, 2000;

Grossman, 2002). Por conta desses mecanismos mais seletivos da sua formação o gás biogênico apresenta-se mais puro e leve do que o gás proveniente da quebra de hidrocarbonetos (Tanaka, 2003).

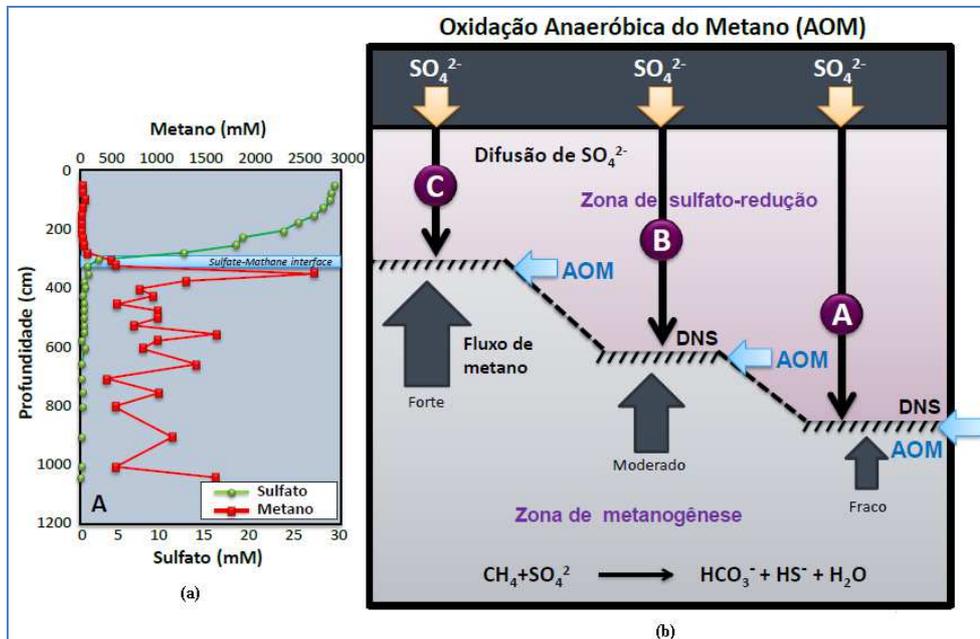


Figura 3.9: (a) Níveis de sulfato e metano por profundidade (Modificado de Ussler & Paul, 2008), (b) Níveis de oxidação anaeróbica do metano em relação à zona de sulfato-redução. Modificado de (Hardage and Roberts, 2006).

Quantitativamente é preciso avaliar o teor orgânico, que deve estar entre 0,5% e 1,0% para que o hidrato seja produzido em quantidade razoável, esse critério traz duas implicações, a primeira é que os HGs não são encontrados longe dos continentes (zonas abissais), já que esses teores de matéria orgânica não seriam possíveis nessa cota de distância; a segunda, é que se faz necessária uma alta taxa de sedimentação para que essa matéria orgânica possa ser rapidamente soterrada e estar relativamente abrigada da zona de atuação de organismos aeróbicos (Clennell, 2000).

As características descritas acima presidem os quesitos para a formação biogênica do gás metano, e para a formação dos HGs propriamente ditos ainda é necessária uma temperatura baixa, e espaço suficiente, já que a sua estruturação não é uma questão de reação química, mas sim de mudança de fase física (de 1ª ordem), e os processos de formação em nível de molécula não são detalhadamente compreendidos ainda (Gao *et al.*, 2005 *apud* Maslin, 2010).

Outra possível origem encontrada na literatura preconiza que o metano dos HGs consiste no estágio final de catagênese, onde hidrocarbonetos formados pela decomposição da matéria orgânica disposta em sedimentos bastante profundos (rocha geradora) se transformam gradativamente em compostos mais leves (inclusive gás) durante o processo de craqueamento, nesse caso, diz-se que o metano é de origem termogênica. Os compostos mais leves, entre eles o gás, por diferença de densidade entram em desequilíbrio dentro do contexto geológico e tendem a emergir para o leito marinho (exsudação), se não forem retidos antes por uma formação rochosa (rocha selante) que possa impedir sua passagem (Tan, 2012, Tanaka, 2003).

Analogamente ao sistema petrolífero, para os HGs de origem termogênica é preciso que essa série de características geológicas particulares citadas no parágrafo acima esteja favoravelmente vinculada em um cenário de tempo-espço na escala geológica. Este cenário compreende uma rocha geradora profunda que vai abrigar a matéria orgânica durante a catagênese, alguma(s) rota(s) de migração através de falhamentos e fraturas para que o gás possa tentar escapar para a superfície marinha, uma rocha selante (capeadora) que impeça a passagem desse gás, e uma rocha (reservatório) suficientemente porosa e subjacente à rocha selante, para aloca-lo em seus poros intersticiais onde será possível a estruturação dos HGs (Tanaka, 2003, Tan, 2012)

No Cone do Amazonas o controle geológico estabelecido pelos dois grandes compartimentos (SE e NW) estruturais deixa indicativos de que a SE, zona em que os BSRs aparecem acompanhando um substrato sedimentar muito pouco deformado se justificaria melhor uma origem biogênica, enquanto a NW os BSRs aparecem cortando a estratificação em zonas de falhamento, neste ponto as linhas sísmicas apresentam características *Push Up* indicando alterações térmicas locais geradas pela percolação de fluidos térmicos oriundos de substratos inferiores onde o processo geológico atual teria gerado bons condutos para a migração, favorecendo a hipótese de uma participação termogênica majoritária (Tanaka, 2003).

### **3.4. Caracterização de HGs**

Segundo Barros (2009) e Thaku (2011), os hidratos de gás (HG) são detectáveis por diversos métodos, como por exemplo: amostragem direta (testemunhos, furos de sondagem e amostras de fundo), ou por inferências a partir de sísmica de reflexão, sísmica de alta

resolução, VSP (*Vertical Seismic Profile*), perfis de poço (*Well Log*) e até eletromagnetismo, mas a sísmica de reflexão em ambientes marinhos é a principal forma de detecção de hidratos de gás em larga escala.

No perfil sísmico, a presença de HGs é inferida por um refletor de alta amplitude, com polaridade invertida em relação ao fundo marinho e comumente subparalelo ao mesmo, este refletor é conhecido como BSR (*Bottom Simulating Reflector*). O BSR delimita a profundidade máxima de estabilidade dos HGs, e perfurações do projeto ODP (*Ocean Drilling Project*) têm revelado que a zona abaixo dessa profundidade é rica em gás livre (Clennell, 2011). Ligado a essa zona de sedimentos contendo gás livre existe um padrão de reflexão sísmica que frequentemente acompanha o BSR, esse padrão é chamado de *Blanking* (clareamento, ou blindagem), e como sugere o nome, ele representa uma zona sísmicamente diáfana, extremamente esmaecida (Barros, 2009).

As modelagens sísmicas envolvendo HGs são de grande valia para a interpretação de características sísmicas esperadas em dados reais, uma vez que viabilizam ao intérprete a aproximação entre o perfil sísmico do dado real e modelo geológico e geofísico associado a ele (Pintas, 2011, Thakur, 2011).

Nas modelagens assume-se que a velocidade de propagação de ondas sísmicas  $V_p$  seja: 1500 m/s na água, 1800 m/s nas camadas mais superficiais de sedimentos marinhos, aproximadamente 2250 m/s para os hidratos de gás e em torno de 1660 m/s em camadas sedimentares abaixo do BSR associadas a gás livre. Esses transientes de velocidade são os responsáveis pelo efeito de inversão de polaridade do BSR em relação ao fundo, na interface com o fundo marinho a velocidade muda de 1500 m/s (velocidade na água) para 1800 m/s (velocidade nas primeiras camadas), esse aumento de velocidade gera um coeficiente de reflexão positivo (figura 3.10) (Clennell, 2000; Pintas, 2011).

Outro grande contraste entre velocidades se dá na interface entre os hidratos de gás e os sedimentos saturados de gás livre nas camadas sotopostas, onde a velocidade da onda diminui abruptamente de 2250 m/s (velocidade no hidrato de gás) para 1660 m/s (velocidade nos sedimentos com gás), gerando um coeficiente de reflexão negativo (Pintas, 2011).

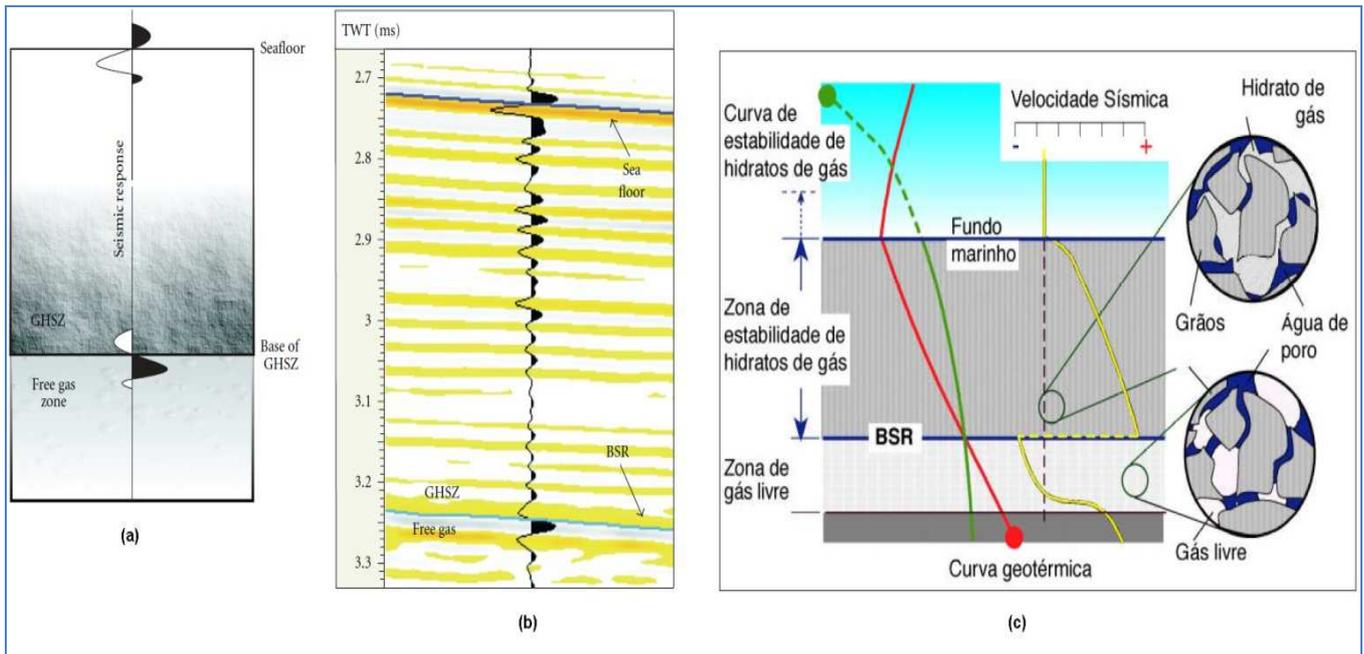


Figura 3.10: (a) Resposta teórica da onda sísmica no fundo do mar e na Gas Hydrate Stability Zone (GHSZ) (Adaptado de Tomasini, 2011); (b) Resposta sísmica de uma seção na margem continental do Uruguay (Adaptado de Tomasini, 2011); (c) Esquema representativo da curva de estabilidade de hidratos de gás da curva geotérmica dos sedimentos marinhos, na camada de interseção entre as duas se forma o hidrato de gás, e logo abaixo mostra a zona de gás livre, cujo contraste de velocidade aparece na sísmica na forma de BSR (Clennell, 2000). Destaque para os contrastes de variação da velocidade sísmica.

Apesar da característica tão marcante evidenciada pelo BSR, é possível que os hidratos de gás passem despercebidos caso os estratos sedimentares estejam paralelos ao fundo oceânico como no caso da figura 3.11, no Cone do Amazonas, mas se torna patente a aparição de um BSR quando ele trunca toda a estratificação deformada por estruturas compressivas, como mostra a figura 3.12.

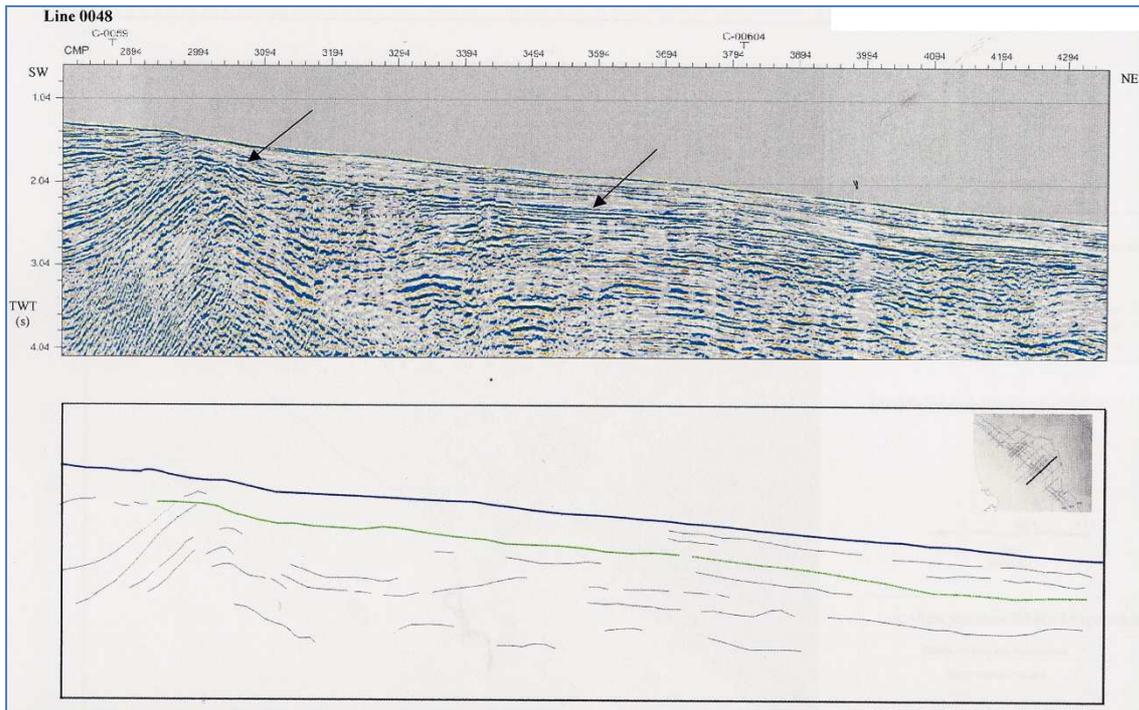


Figura 3.11: BSR apontado pelas setas no Cone do Amazonas, destaca-se que, neste caso, ele está subparalelo aos demais planos de acamamento na maior parte do perfil. Retirado de (Tanaka, 2003).

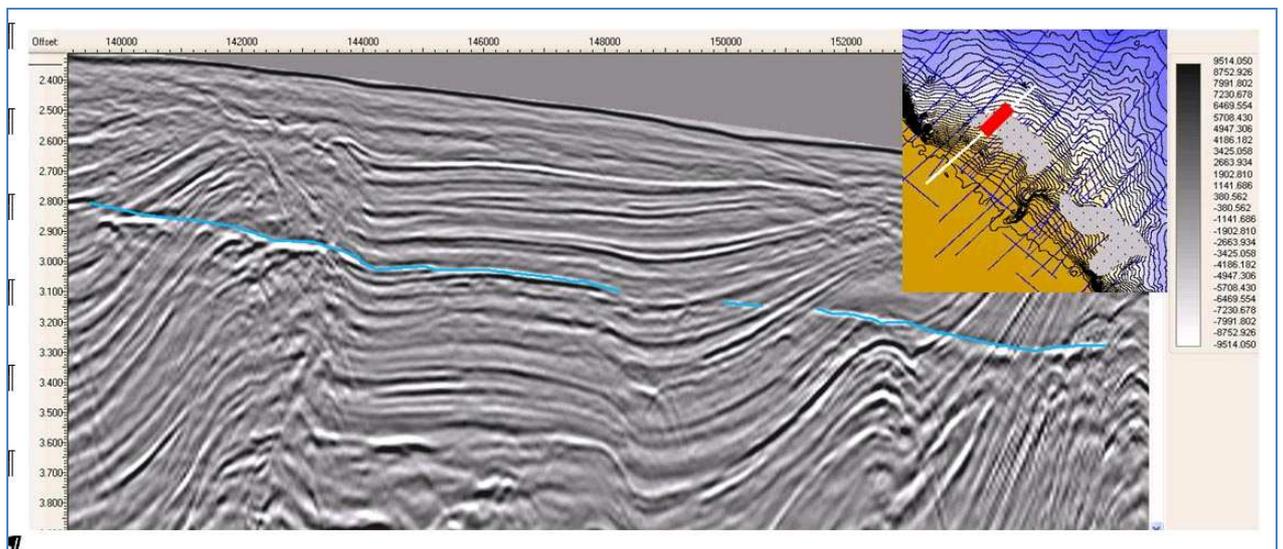


Figura 3.12: O BSR (em azul) que aparece cortando estruturas pré-deformadas foi localizado no Cone do Amazonas e identificado pelo Grupo Geomargem.

Existem ainda outras maneiras de se identificar HGs indiretamente, como por exemplo, na testemunhagem, onde as inferências são feitas com base em padrões de estrutura

e textura que são encontrados em testemunhos, esta perturbação é gerada pela expansão do gás que, uma vez retirado da sua zona de estabilidade de temperatura e pressão, expande-se desarrumando a estratificação sedimentar ao passo em que o testemunho é puxado do fundo oceânico, essa estrutura é chamada de *Honeycomb* e foi encontrada no Cone do Amazonas (figura 3.13) (Flood, 1997).

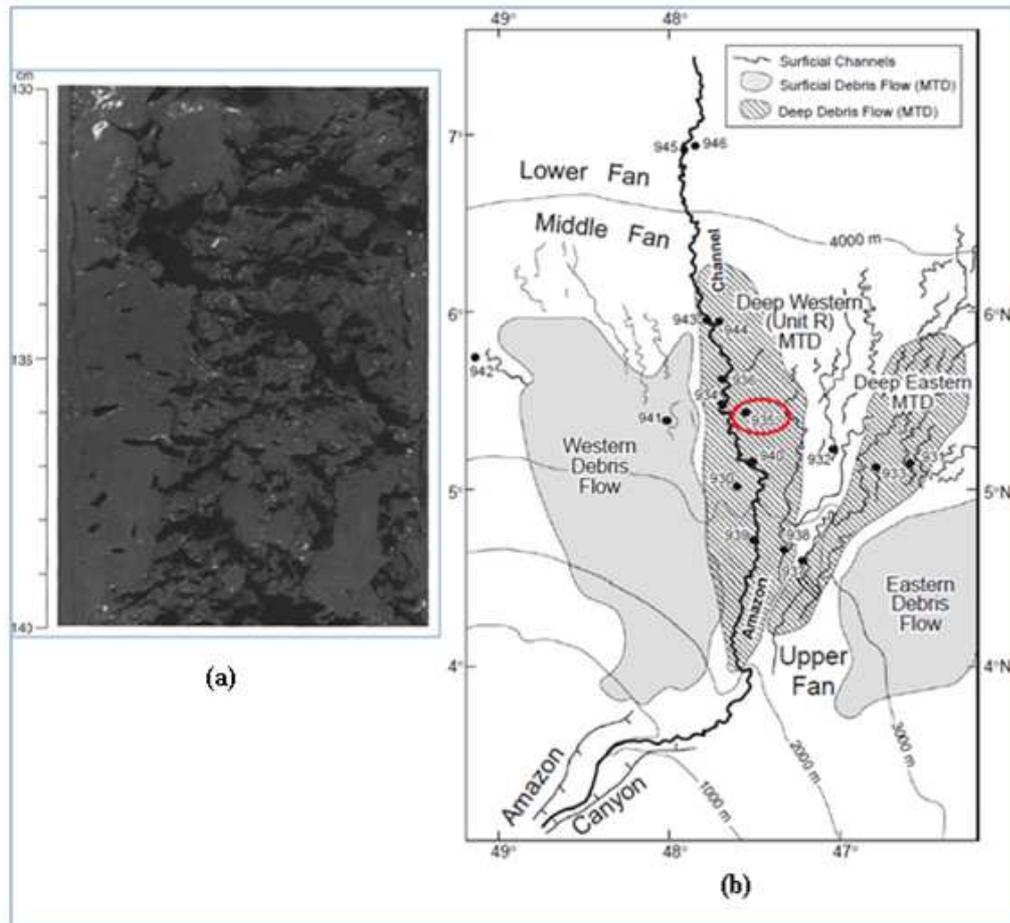


Figura 3.13: (a) Estrutura Honeycomb encontrada no testemunho do furo 935 (Flood *et al.* 1995), (b) Mapa do Cone do Amazonas com os respectivos movimentos de massa mapeados até então e a localização (circulo vermelho) do furo 935 da Leg 155 da ODP. Retirado de (Maslin, 2005).

Devido à expansão que o gás dos hidratos sofre durante a dissociação é comum ver o efeito *Blow Out* causado pela expulsão dos sedimentos no topo do testemunhador a pistão quando este é retirado (figura 3.14). Outro aspecto dos testemunhos pode ser verificado diretamente é que fraturas e falhas podem hospedar nódulos ou até blocos de HGs, e muitas vezes nos mesmos testemunhos eles aparecem próximos a nódulos de carbonato gerados através da oxidação do metano pelo sulfato da água do mar (figura 3.15) (Freire, 2012).



Figura 3.14: Retirada de pistões de amostragem. Chama a atenção o extravazamento dos sedimentos expulsos pelo gás dissociado dos hidratos contidos no pistão. Retirado de (Freire, 2012).

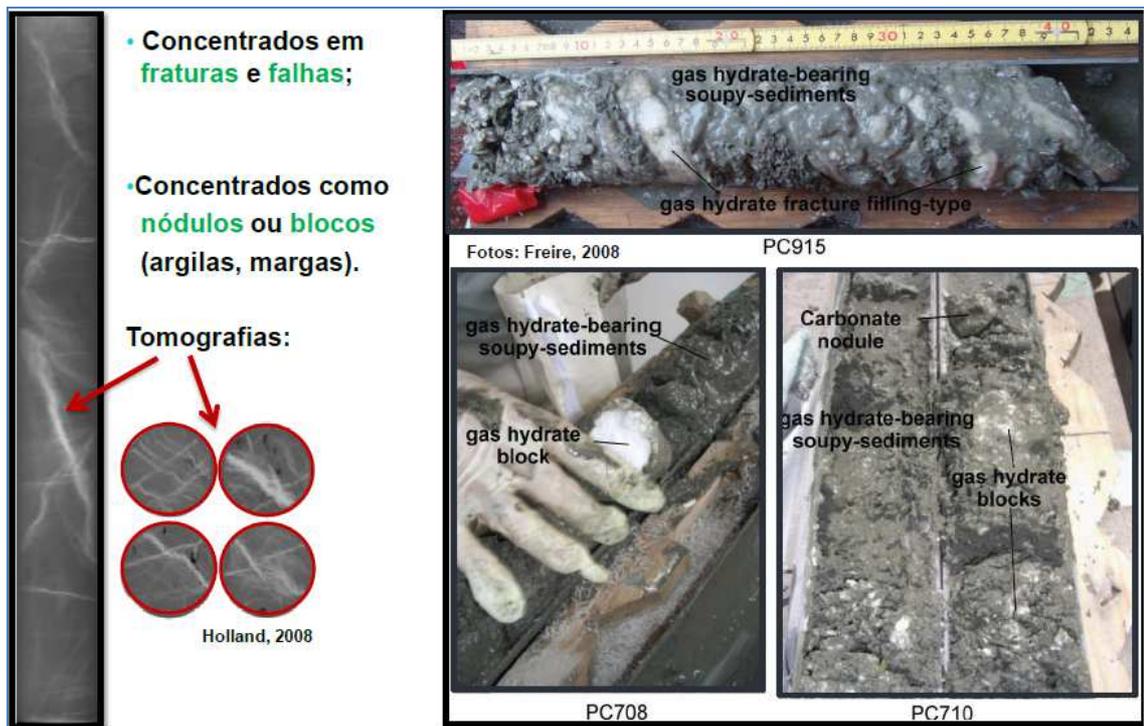


Figura 3.15: compilação de imagens onde os hidratos de gás aparecem em diversas em testemunhos. Retirado de (Freire, 2012).

Outra maneira de caracterizar a potencial formação de HGs é através de crossplots gerados com dados da temperatura do fundo marinho e gradiente geotérmico. Além disso podem ser adicionados diagramas de fase de estabilidade de HG para cada tipo de composição e de origem do gás. Um trabalho realizado no Cone do Amazonas relaciona todas as

grandezas supracitadas utilizando dados de temperatura de fundo da ODP e calibrados por dados da marinha para obter um campo contínuo de temperaturas de fundo marinho e relacioná-los plots dos diagramas de fase de estabilidade mostrado na figura 3.16 (Tanaka, 2003).

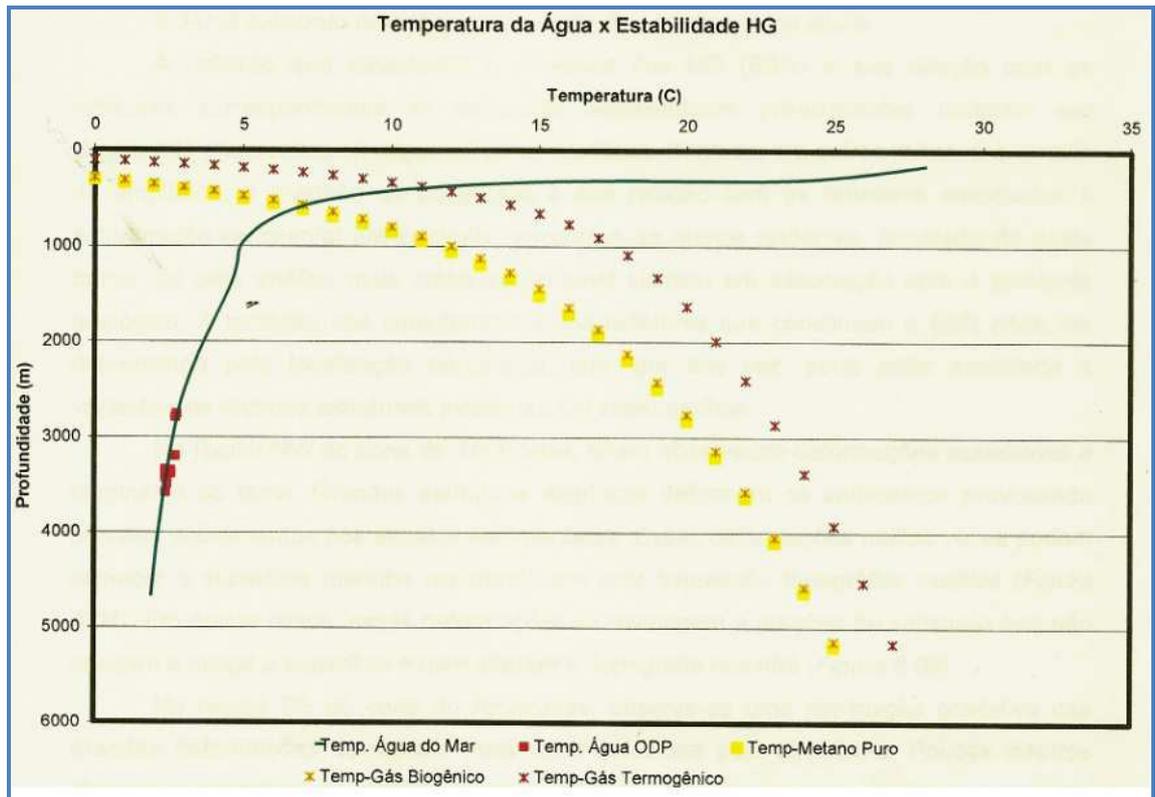


Figura 3.16: Gráfico comparativo entre os Diagramas de Fase e a Temperatura da água para a região. O gráfico considera o conjunto de plots que forma curvas para gás metano puro, gás de origem biogênica e gás de origem termogênica e as temperaturas da água para cada profundidade. Indicativos teóricos apontam para condições físico-químicas favoráveis para a formação de HG em torno de 320 – 350 m e 11,5° C para o metano termogênico; e de 600 m e 6,5° C para gás metano puro ou biogênico. Retirado de (Tanaka, 2003).

### 3.5. Processos de MTD e sua associação com os HGs no Cone do Amazonas

Conforme já foi mostrado anteriormente, a estabilidade dos HGs é extremamente volúvel, e a dissociação deles pode induzir ou ser induzida por fatores geológicos e climáticos.

Os Movimentos de Transporte de Massa (MTDs) estão entre os principais processos geológicos que coincidem com a dissociação de HGs, os depósitos sedimentares que

registram esses eventos vêm sendo identificados nas adjacências dos HGs inferidos no Cone do Amazonas através de perfis sísmicos. Os depósitos de movimentos de massa não estão restritos ao Cone do Amazonas, mas foram mapeados em toda a Bacia da Foz do Amazonas, em maior ou menor escala, muito embora somente os depósitos (menor escala) próximos ao leque submarino superior possam estar associados à desestabilização de HGs, visto que é nessa zona que eles frequentemente se formam (Melo, 2009). Alguns autores (Melo 2009, Tanaka 2003) mapearam BSRs que apontam a formação de HGs na frente tectônica compressiva (*fold-and-thrust belts*) do Cone do Amazonas (figura 3.17) onde são estabelecidas condições de superpressurização que compensam as desfavoráveis condições de gradiente geotérmico do local, essa frente compressiva por sua vez está em um nível mais superficial de destacamento (*décollement*) mapeado na região (figura 3.18) (Melo, 2009).

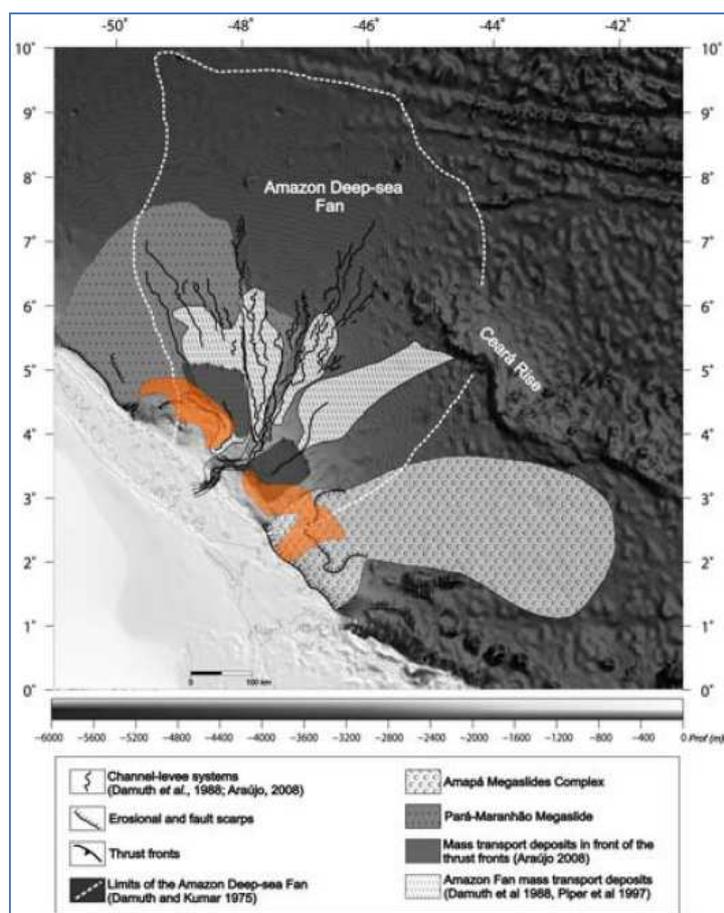


Figura 3.17: Localização dos depósitos de transporte de massa mapeados por diversos autores (Araújo, 2008, Reis et al., 2009) e das ocorrências de hidratos (em laranja) mapeadas por Melo et al., 2008. Modificado de (Melo, 2009).

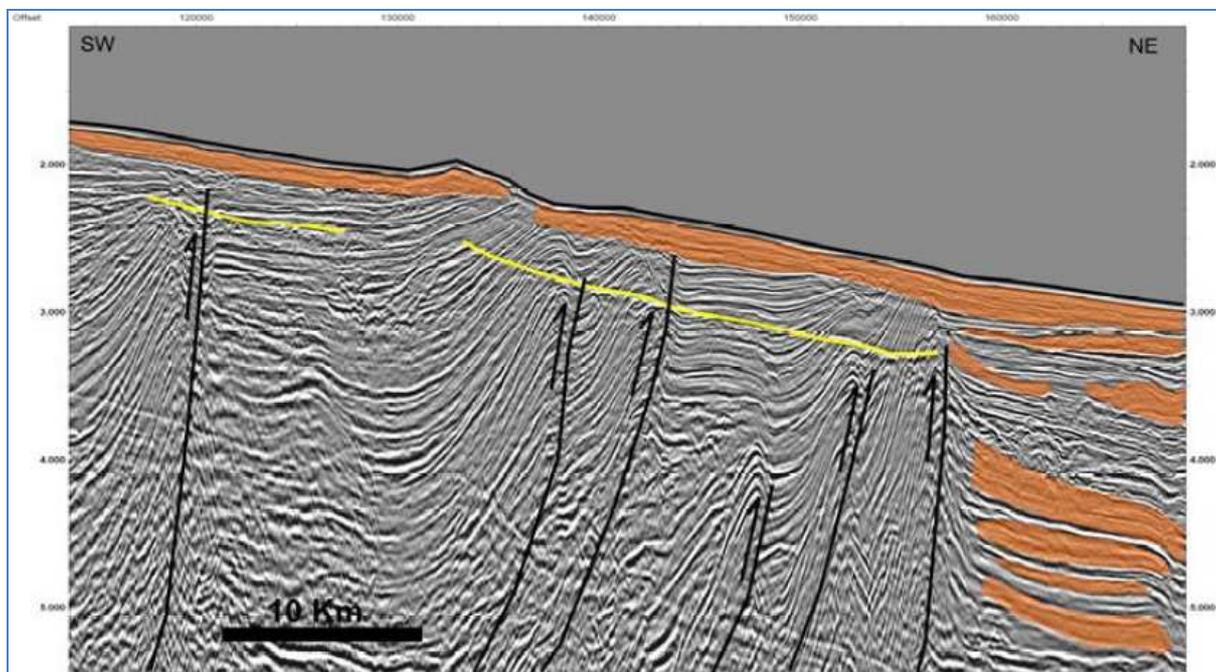


Figura 3.18: Seção sísmica interpretada com o BSR em Amarelo, as falhas reversas da frente compressiva do Cone do Amazonas e os depósitos de movimentos de massa representados pela cor laranja. Retirado de (Melo, 2009).

Em paralelo a discussão sobre o disparo de MTDs no Cone do Amazonas, outros autores propõem que esses eventos catastróficos do talude continental vêm ocorrendo ciclicamente, não só no Cone do Amazonas como também em diversas áreas do globo durante períodos de subida e rebaixamento do nível do mar em decorrência de mudanças climáticas (Maslin, *et al.*, 1998, Maslin, *et al.*, 2010, Machado, 2009, Chappellaz *et al.*, 1990).

#### 4. Atributos Sísmicos

Os atributos sísmicos foram desenvolvidos desde o começo da década de 30 quando foram introduzidos no contexto exploratório, o primeiro e mais usado até hoje é a amplitude, cuja análise minuciosa, a princípio, permitia a identificação de *bright spots* para a indústria petrolífera. Desde então a busca por atributos que ressaltassem padrões como este foi o que

propulsou o seu desenvolvimento (Chopra, 2005, Barnes, 2001). A evolução dos atributos sísmicos acompanha a evolução da própria sísmica, desde a introdução a forma digital da aquisição de dados sísmicos em 1963 que os coloca numa faixa dinâmica apreciável para a investigação de variações de amplitude, passando pela detecção de frequências atenuadas por *reefs* preenchidos por gás, até os atributos mais modernos em cubos sísmicos 3D multianálise (*Multi-attribute analysis*) (figura 4.1) (Coren, 2001, Barnes, 2001).

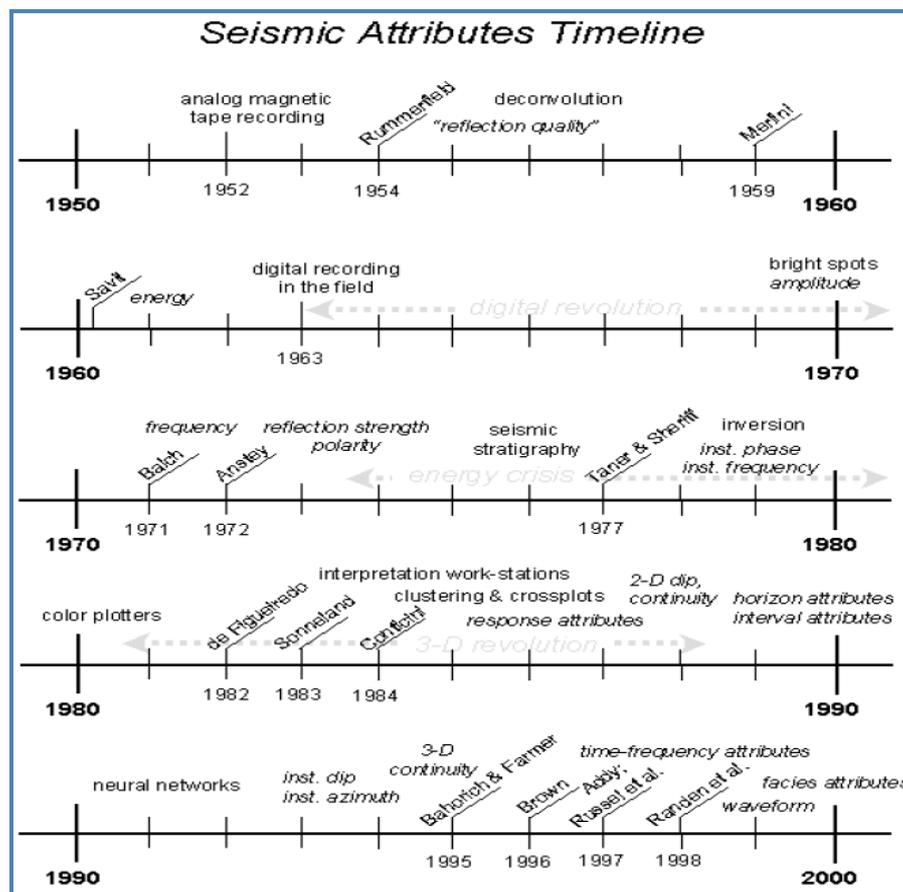


Figura 4.1: Linha do tempo dos atributos sísmicos de 1960 até 2000 mostrando a evolução dos atributos junto com o estudo da sísmica. Os papers mais importantes estão em diagonal enquanto os atributos aparecem em itálico. Retirado de (Barnes, 2001).

Os atributos sísmicos tentam extrair características específicas que representam subconjuntos do dado sísmico total, embora a interpretação qualitativa e individualmente de cada atributo sísmico tenha feito parte da rotina do intérprete no passado, atualmente há um esforço para torná-los um método cada vez mais quantitativo na medida em que eles passam a ser calibrados por dados de poços (Taner, 1994, Taner, 2001). Independente do método

utilizado, os atributos filtram e revelam propriedades intrínsecas ao dado sísmico de maneira a permitir a identificação de determinados padrões e tendências que, a priori, teriam relação com as informações geológicas que foram carregadas através das ondas sísmicas, muito embora a sua relação direta com as mesmas ainda não esteja totalmente esclarecida, o que acaba por lhes dar um viés bastante empírico (Barros, 2009, Taner, 1994, Taner, 2001, Barnes, 2001).

Com efeito, alguns dos atributos sísmicos surgem como decomposições do sinal sísmico complexo, em diversas partes constituintes, e cada uma dessas partes pode ser computada para permitir ao intérprete uma previsão ou extrapolação de litologias (estratigrafia, fácies, composição e estrutura), bem como características de reservatórios, ou ainda configurações de reflexão (Taner, 1994, Barnes, 2001). Evidentemente existe uma gama imensa de dados sísmicos (figura 4.2), mas pela eficiência para se detectar hidratos os principais seriam: Velocidade Intervalar, Impedância Acústica, Amplitude vs Offset (AVO), Envelope, Frequência Instantânea, Fase Instantânea e Fator de Qualidade (Barros, 2009).

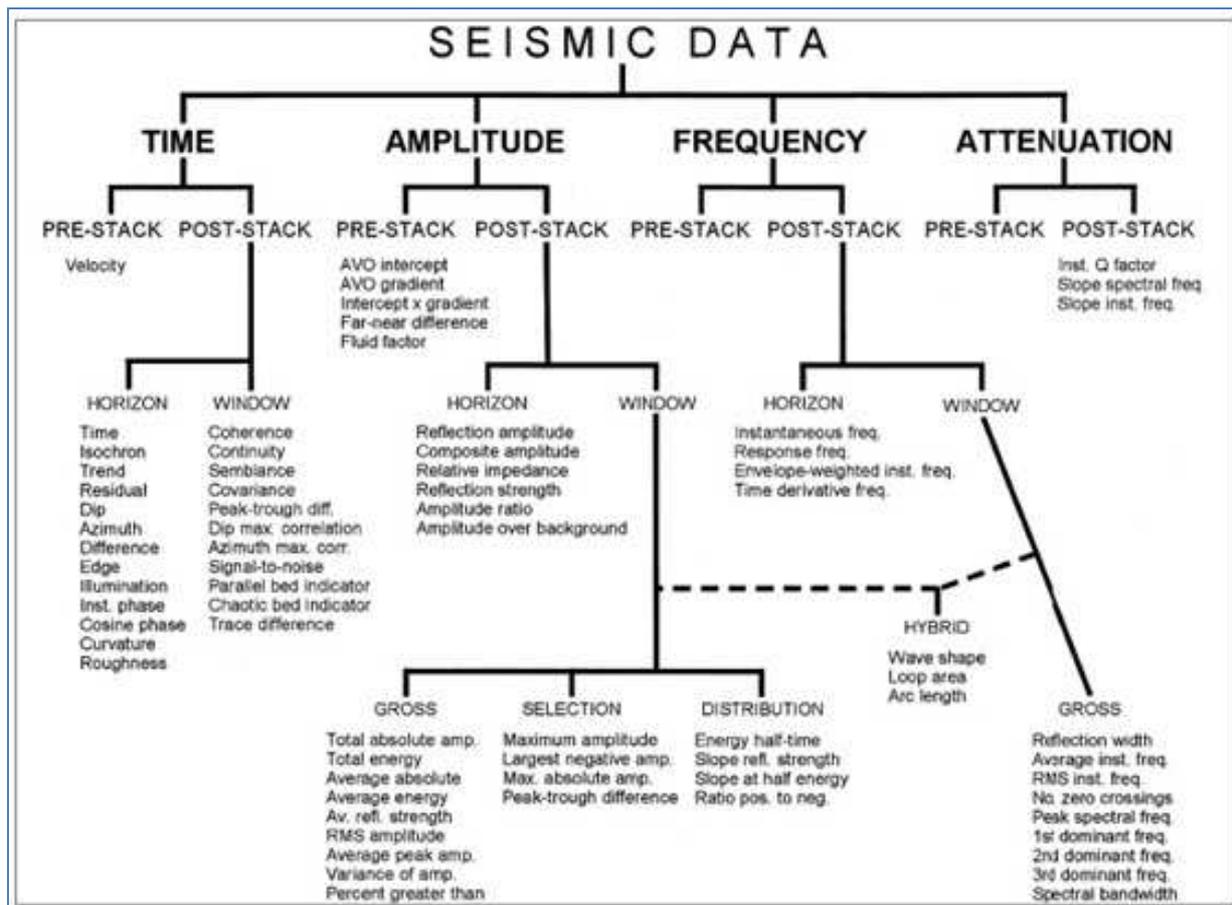


Figura 4.2: Classificação de atributos sísmicos segundo. Retirado (Brown, 2001).

Note na figura 4.2 que todas as famílias de atributos possuem duas grandes ramificações destacadas em termos de processamento: atributos pré-stack atributos pós-stack.

#### Atributos Pré-Stack

Nesse tipo de atributo os dados de entrada são CDP (*Common Depth Point*) ou *Image Gather Traces*, eles vão reunir informações relacionadas com a direção (azimute) e afastamento fonte-receptor (*offsets*). Possuem como característica a geração de arquivos muito grandes e por isso não são indicados para estudos iniciais (Taner, 1992 apud Barros, 2009).

#### Atributos Pós-Stack

Segundo Barros (2009), devido ao processo de empilhamento (*Stacking*) a perda de informações relacionadas a *offsets* e a azimute é inevitável. Os dados de entrada podem ser CDPs empilhados ou migrados, mas é importante ressaltar que a migração em tempo irá preservar as relações com o tempo, as variações em tempo, e a frequência.

Este trabalho se utilizará de alguns dos primeiros atributos gerados (*Complex Trace Statistics*), e a técnica matemática que permite o cálculo dessa série de atributos sísmicos

consiste em tratar a amplitude sísmica como a parte real de um sinal analítico complexo, enquanto a parte imaginária é extraída a partir da Transformada de Hilbert (Taner *et al.*, (1979) *apud* Barros, 2009), e a partir desse conceito foi criada uma família de atributos sísmicos nomeada de: Atributos Instantâneos (Envelope, Fase, Frequência, etc.) (Taner e Sheriff (1997) *apud* Barros, 2009).

Através da análise do sinal sísmico complexo foi possível distinguir duas componentes mensuráveis no sinal sísmico, a amplitude e a fase (figura 4.3); que poderiam ainda ser estatisticamente desenvolvidas para formar outros atributos sísmicos (Taner *et al.*, 1979).

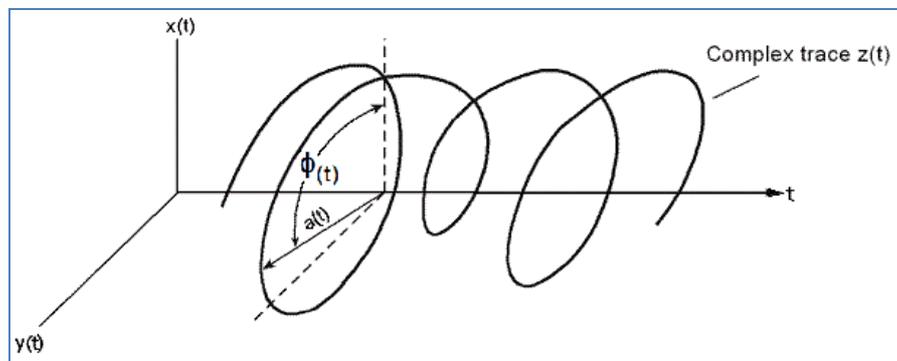


Figura 4.3: Representação espacial-temporal do Sinal Complexo “z(t)” e sua relação com a amplitude “a(t)” e a fase do sinal “ $\Phi(t)$ ”. (Modificado de Hardage, 2010)

Determina-se o componente imaginário  $q(t)$  do sinal a partir de  $f(t)$ . Determina-se  $f(t)$  por uma operação de convolução linear, e reduz-se a representação fasorial se  $f(t)$  tiver um comportamento senoidal, que seja:

$$q(t) = A \operatorname{sen}(\omega t + \Phi) \text{ sendo } f(t) = A \operatorname{cos}(\omega t + \Phi) \text{ válido para todos os valores reais de } A \text{ e } \Phi, \omega > 0.$$

Assumindo as duas condições acima descritas sendo suficientes para que  $f(t)$  se torne representável por uma série de Fourier, então obtemos a expressão:

$$F(t) = f(t) + j^*q(t) = A(t) e^{j\Phi(t)} \text{ [eq. 1]}$$

Através da [eq. 1] é possível deduzir as expressões (eq.2, eq.3, eq.4) que dão significado matemático para os atributos sísmicos (Nissen, 2002), as variáveis que estão representadas na figura 4.4 são:

Envelope:

$$A(t) = [f(t)^2 + q(t)^2]^{1/2} \text{ [eq. 2]}$$

Fase Instantânea:

$$\Phi(x,t) = \arctan [q(x,t) / f(x,t)] \text{ [eq. 3]}$$

Frequência Instantânea:

$$\omega(t) = d\Phi(t) / dt \text{ [eq. 4]}$$

Que também pode ser expressa em forma de convolução como:

$$\omega(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} d(\delta) \theta(t - \delta) d(\delta) \text{ [eq. 5]}$$

Mas a [eq. 5] demanda uma função contínua, então para efeito de implementação computacional é mais conveniente substituir a variável “ $\Phi$ ” da [eq. 3] na [eq. 4], logo:

$$\omega(t) = d \{ \arctan [q(x,t) / f(x,t)] \} / d(t)$$

Obtendo expressão explícita pela regra de derivação:

$$\omega(t) = [f(t) * dg(t)/d(t)] - [g(t) * df(t)/d(t)] / f^2(t) + g^2(t)$$

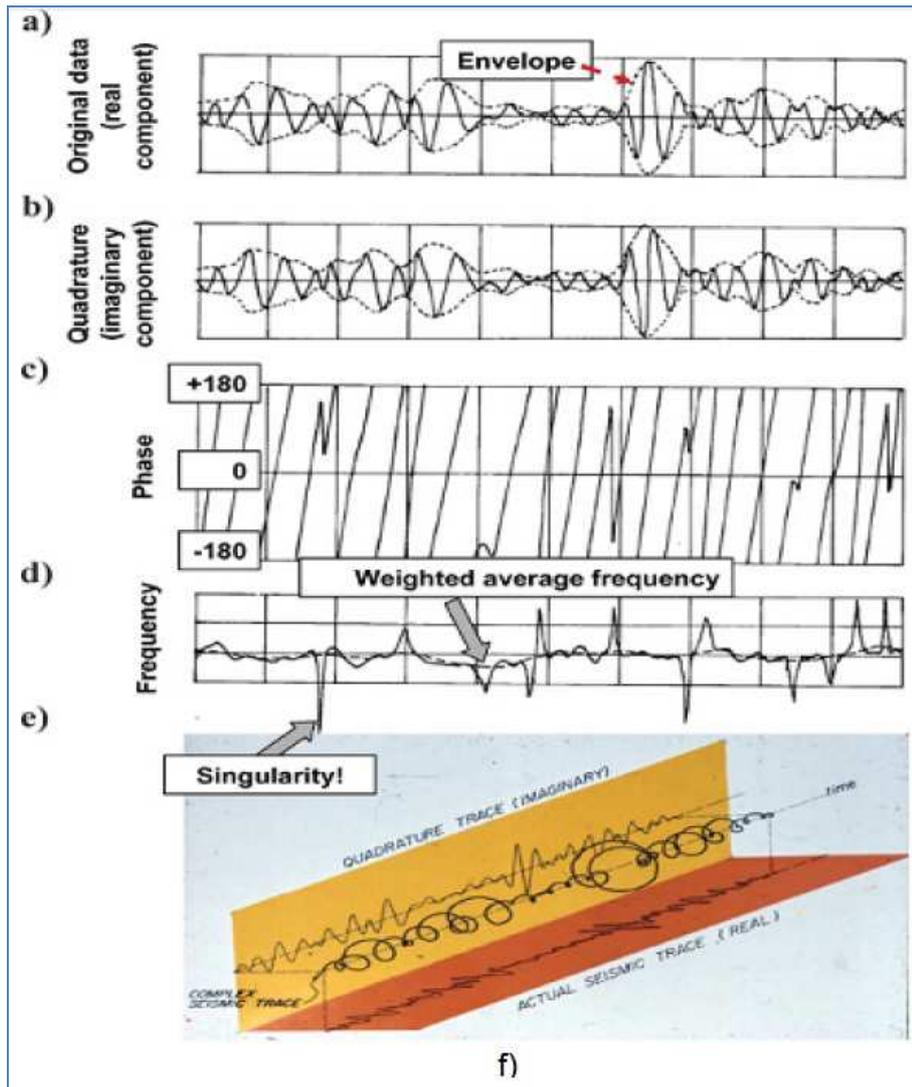


Figura 4.4: a) traço sísmico (real), b) componente imaginária do sinal (quadratura), c) fase instantânea, d) frequência instantânea, e) análise de um sinal analítico complexo, f) projeção da componente de quadratura (amarelo) e componente real (abóbora) de um sinal analítico complexo, f) projeção da componente de quadratura (amarelo) e componente real (abóbora) de um sinal sísmico complexo ao longo do tempo. Retirado de (Chopra & Kurt, 2005)

Alguns outros atributos exploram estatisticamente a amplitude do dado sísmico (*Amplitude Statistics*), geralmente empregando algoritmos que operam na média de uma janela de análise do domínio (*window of seismic*), a maior parte dos atributos pertence a essa categoria (Cooke *et al.*, 1999), entre eles está o *Average Energy*.

Partindo da média das amplitudes de um traço empilhado (*stacked trace*) sobre uma janela de tempo “t” com um incremento de “t+mΔt” dado pela expressão (Sheriff and Geldart, 1995):

$$C_A = \frac{\sum_t^{t+m\Delta t} \left| \sum_{i=1}^N g_{ti} \right|}{t + m\Delta t};$$

onde “m” é uma constante, e  $g_{ti}$  é a amplitude do canal “i” no tempo “t”.

Matematicamente temos que *Average Energy* (figura 4.5) do sinal sísmico proporcional ao somatório das amplitudes do sinal ao quadrado. Colocando a definição em função de um único traço “i”, obtem-se a Energia Média:

$$\langle E \rangle = C_A^2$$

Ou ainda em termos de amostragem:

$$\langle E \rangle = \frac{\sum [A(t)]^2}{xs};$$

onde “xs” é a taxa de amostragem.

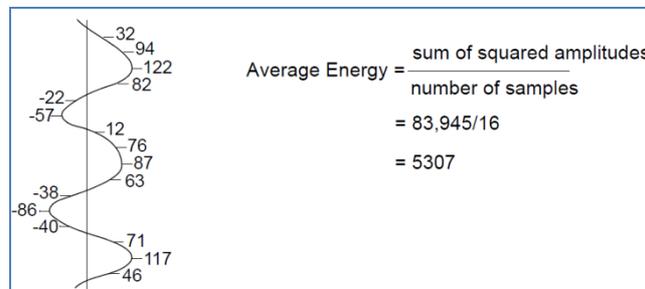


Figura 4.5: Ilustração de como é computado o atributo Average Energy dada uma janela de tempo com os valores das amplitudes representados pelos traços (Landmark, 2004).

Atributos instantâneos são computados de amostra em amostra, e representam variações instantâneas (derivada no tempo) de vários parâmetros. Valores instantâneos de atributos tais como envelope, e seus derivados tais como frequência instantânea e fase instantânea, podem ser determinados a partir do sinal complexo da onda sísmica (Taner, 2001).

A Relevância Geológica dos atributos sísmicos segundo Taner (2000):

Envelope: indicativo de grandes laços litológicos, mudanças de acumulação de gás e fluido e inconformidades.

Fase Instantânea: eventos com continuidade lateral, configuração estratigráfica e estrutural.

Frequência Instantânea: assinatura da frequência de eventos específicos, efeitos de absorção e de fraturamento, espessura da camada alvo, contudo, este atributo geralmente tem um altíssimo grau de variação que pode estar relacionado à estratigrafia ainda que seja muito difícil entender toda a variação desse dado (Yilmaz, 1987).

Average Energy: resumidamente é uma média das amplitudes de trecho-a-trecho (*window of seismic*). Isto proporciona uma medida da reflectividade e permite mapear indicadores de hidrocarbonetos ou determinar corpos e zonas com alto contraste de impedância.

A figura 4.6 são um exemplo de aplicação do atributo de fase instantânea para caracterização de um BSR num estudo de caso no Cone do Rio Grande, Bacia de Pelotas (Barros, 2009).

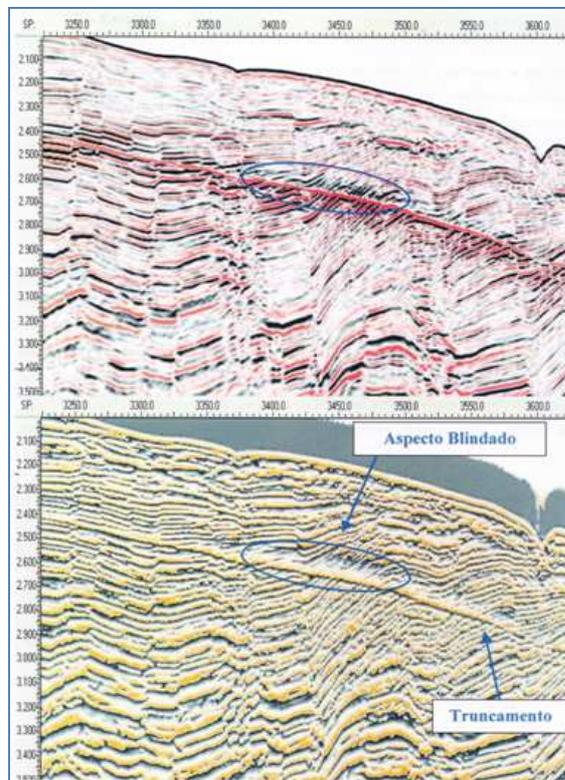


Figura 4.6: Comparação entre Amplitude x Fase Instantânea ilustrando a blindagem (blanking) do BSR em meio a camadas estratigráficas deformadas. Retirado de (Barros, 2009).

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1. Identificação de hidratos de gás no Cone do Amazonas

A identificação de hidratos de gás na região do Cone do Amazonas foi realizada com base na interpretação de perfis sísmicos de reflexão 2D, e o critério básico estabelecido para esta interpretação foram dois padrões sísmicos (BSR, blanking) típicos de zonas com ocorrência de hidratos de gás. Especificamente no Cone do Amazonas o padrão sísmico predominante no que diz respeito à detecção de hidratos de gás foi o BSR, que foi encontrado em alguns perfis sísmicos em orientação dip SW-NE que na maioria das vezes cruzava estruturas deformadas do domínio compressivo no setor Noroeste do Cone do Amazonas e, em outros lugares, foi possível identificar uma sutil blindagem sísmica relacionada ao “*blanking*”. A deformação das camadas sedimentares do Cone do Amazonas, que ocasionou grandes dobramentos (figura 5.1, 5.2 e 5.8), facilitou a identificação do BSR na maioria dos perfis. Em determinadas regiões, como nas áreas mais profundas (figura 5.6 e 5.7), a estratificação plano-paralela que acompanha o fundo do mar dificulta a caracterização tanto do BSR, quanto do *blanking*. Nessas regiões a análise de atributos sísmicos foi de grande utilidade para a sustentar a caracterização dos hidratos gás. Logo abaixo serão apresentados os principais perfis que foram interpretados. Em alguns destes perfis sísmicos os BSR’s encontrados são bastante descontínuos (figura 5.8), truncando diversos refletores e com uma nítida inversão do sinal sísmico, e em outros (figura 5.3, 5.4 e 5.5) é vista uma amplitude que tende a seguir o fundo marinho e que possui uma altíssima em relação aos refletores adjacentes em toda a linha, provavelmente isso se relaciona à existência de gases livres trapeados abaixo da zona de estabilidade dos hidratos de gás.

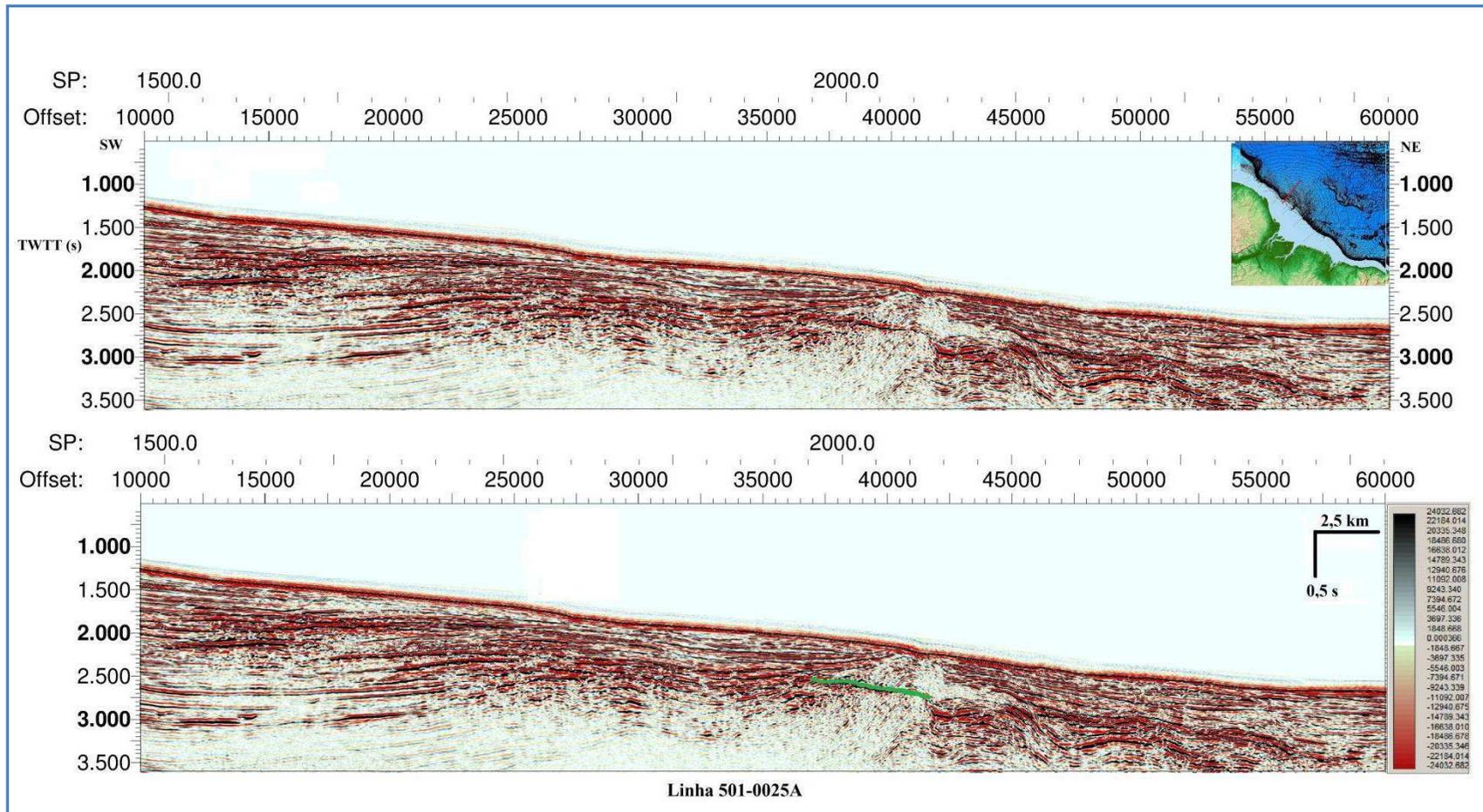


Figura 5.1: nesta linha o BSR interpretado está marcado pelo horizonte em verde. Observa-se que o mesmo está inserido numa estrutura extremamente verticalizada e quase sem refletores internos, configurando uma zona sísmica monótona. Pela extrema verticalização e pelo intenso esmaecimento interno na estrutura, é possível especular sobre a existência de gás livre na mesma (Exagero horizontal = 2x).

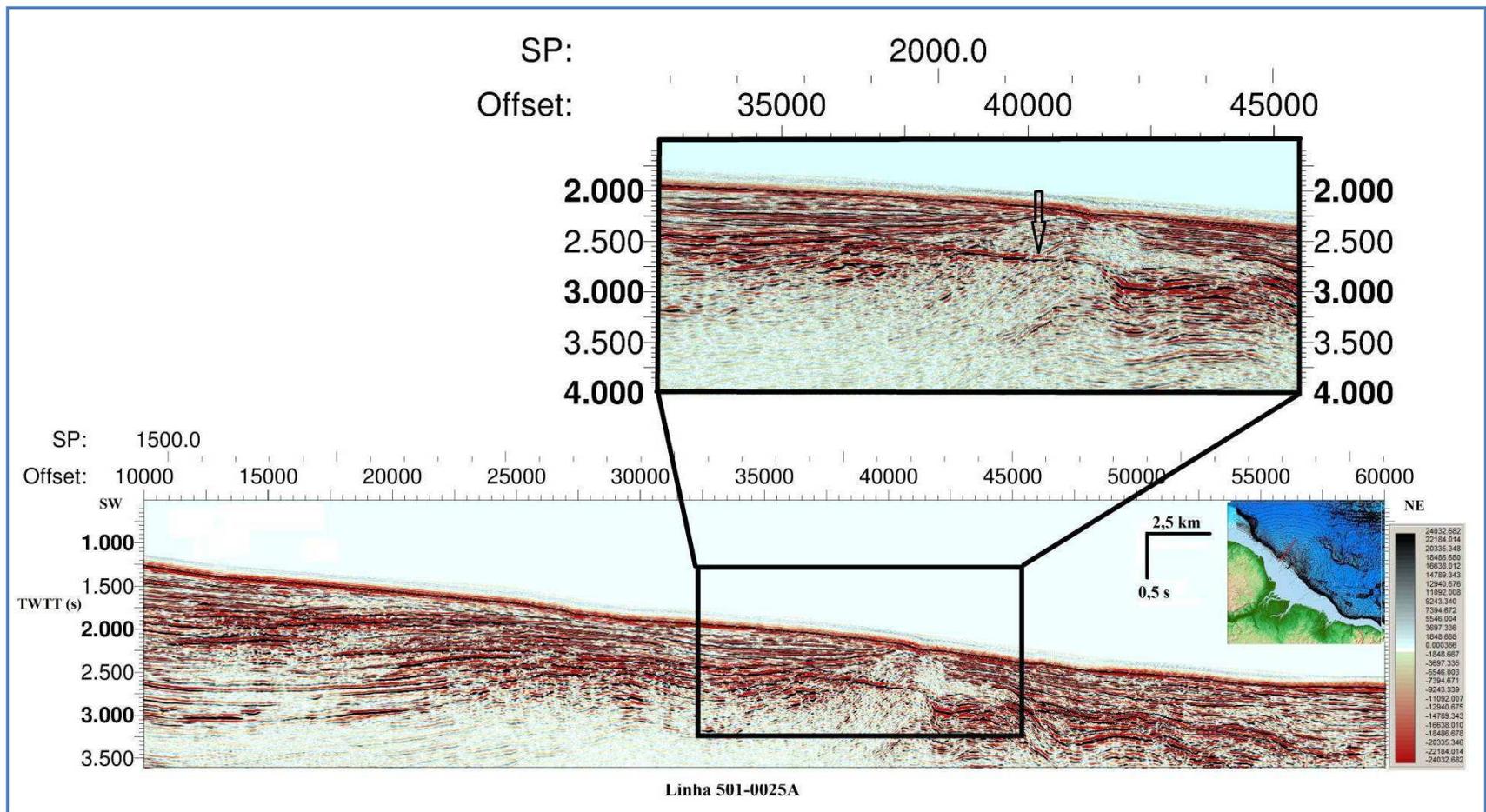


Figura 5.2: aqui o zoom de 4x enquadra a estrutura que contém o BSR. Obs: o refletor associado ao hidrato de gás está apontado pela seta e cruza os poucos refletores visíveis de toda a estrutura, acompanhando o fundo marinho (Exagero horizontal = 2x).

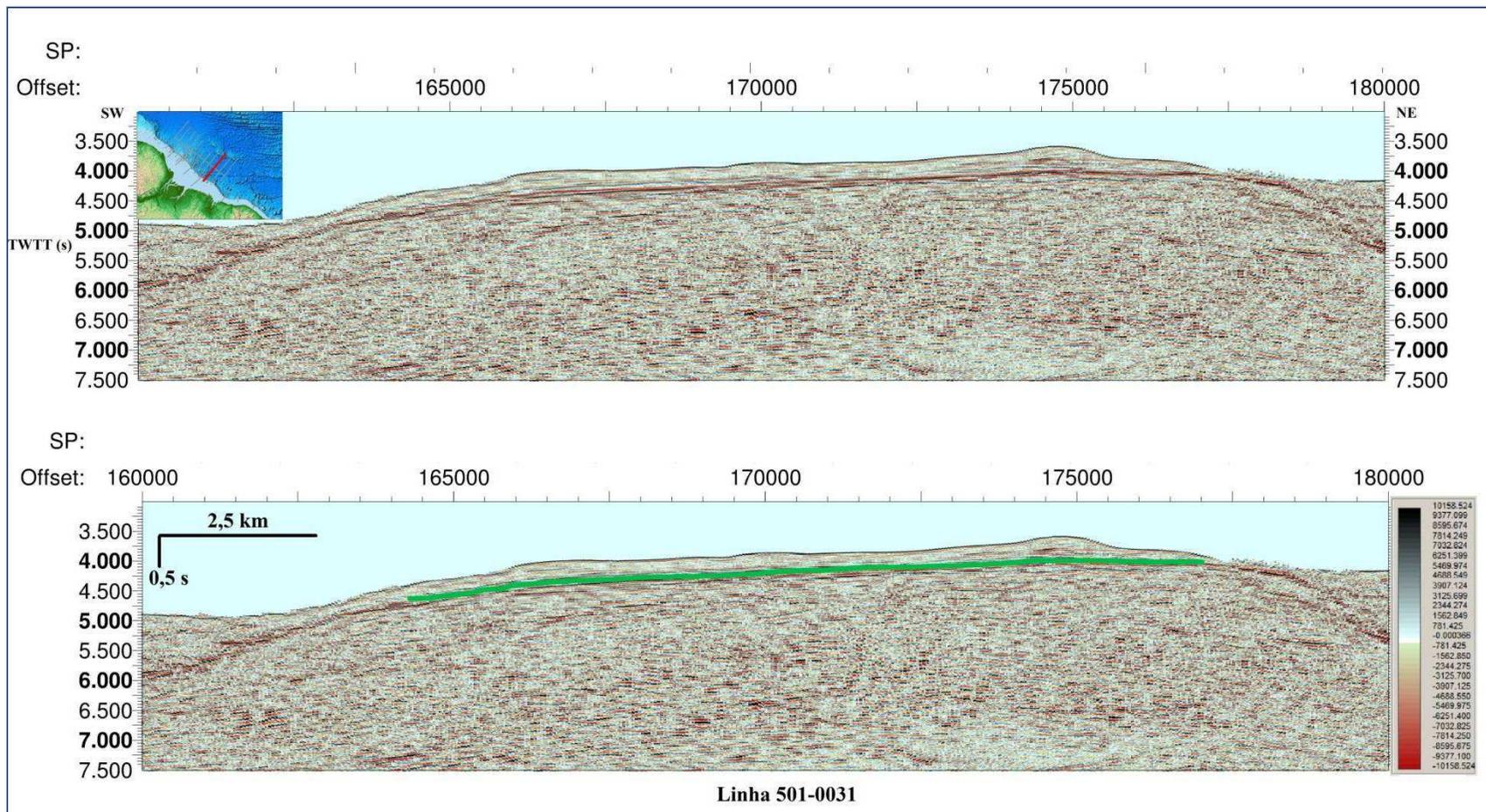


Figura 5.3: esta figura mostra a interpretação com o BSR marcado pelo horizonte em verde (parte inferior da figura). Essa é a única linha do setor Sudeste do Cone do Amazonas, note que esta estrutura não está tão deformada quando as outras, não há refletores internos denotando deformações, no entanto, o próprio fundo marinho está abaulado (Exagero vertical = 2x)

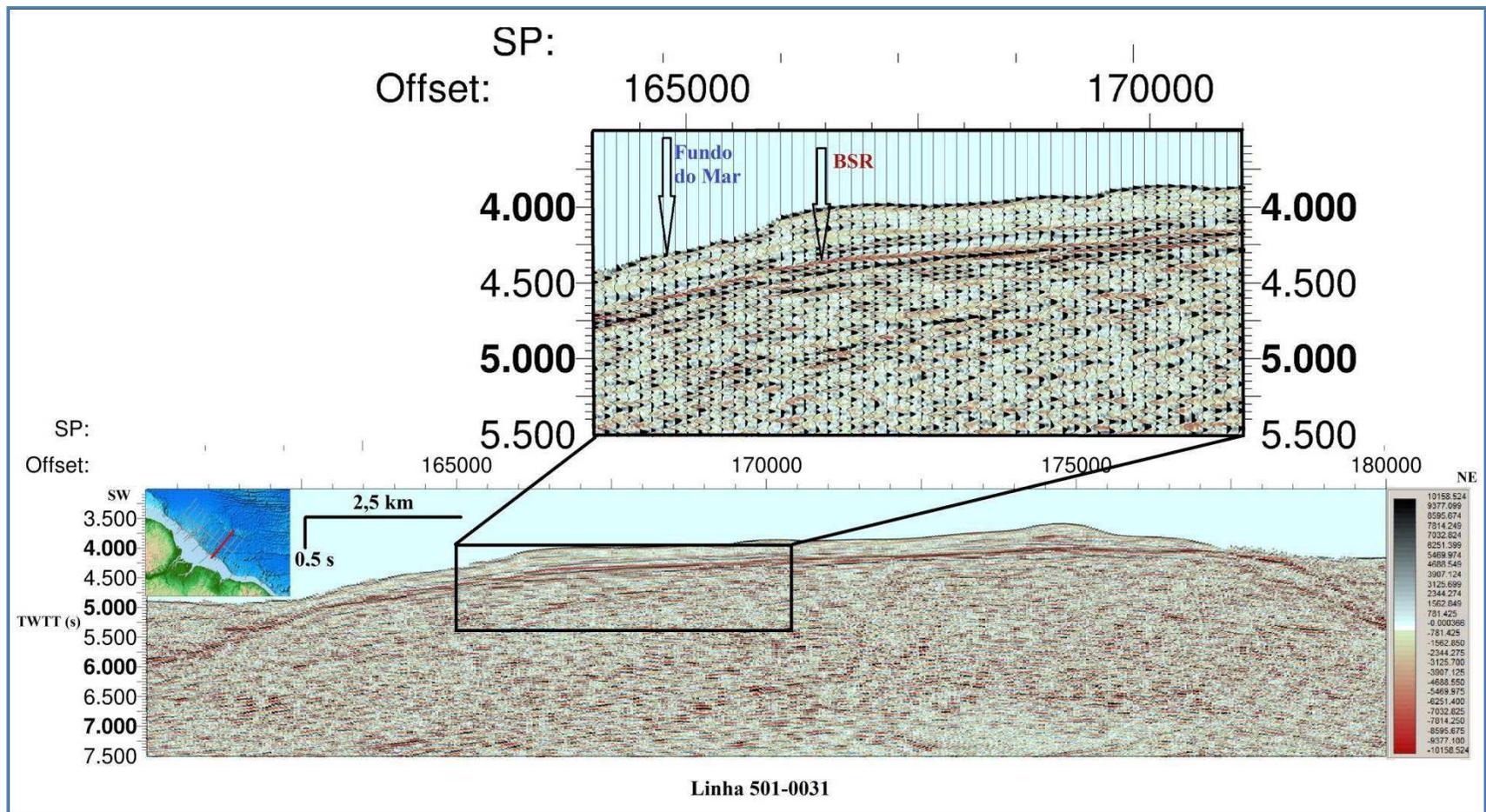


Figura 5.4: zoom (2x) enquadrado na estrutura que contém o BSR, no quadro do zoom foi ativado o recurso wiggle trace para reforçar a polaridade dos refletores mostrando cada traço individualizado, ressaltando os refletores do fundo do mar e do BSR com a polaridade invertida, positiva e negativa, respectivamente, ambos apontados pelas setas (Exagero vertical = 2x).

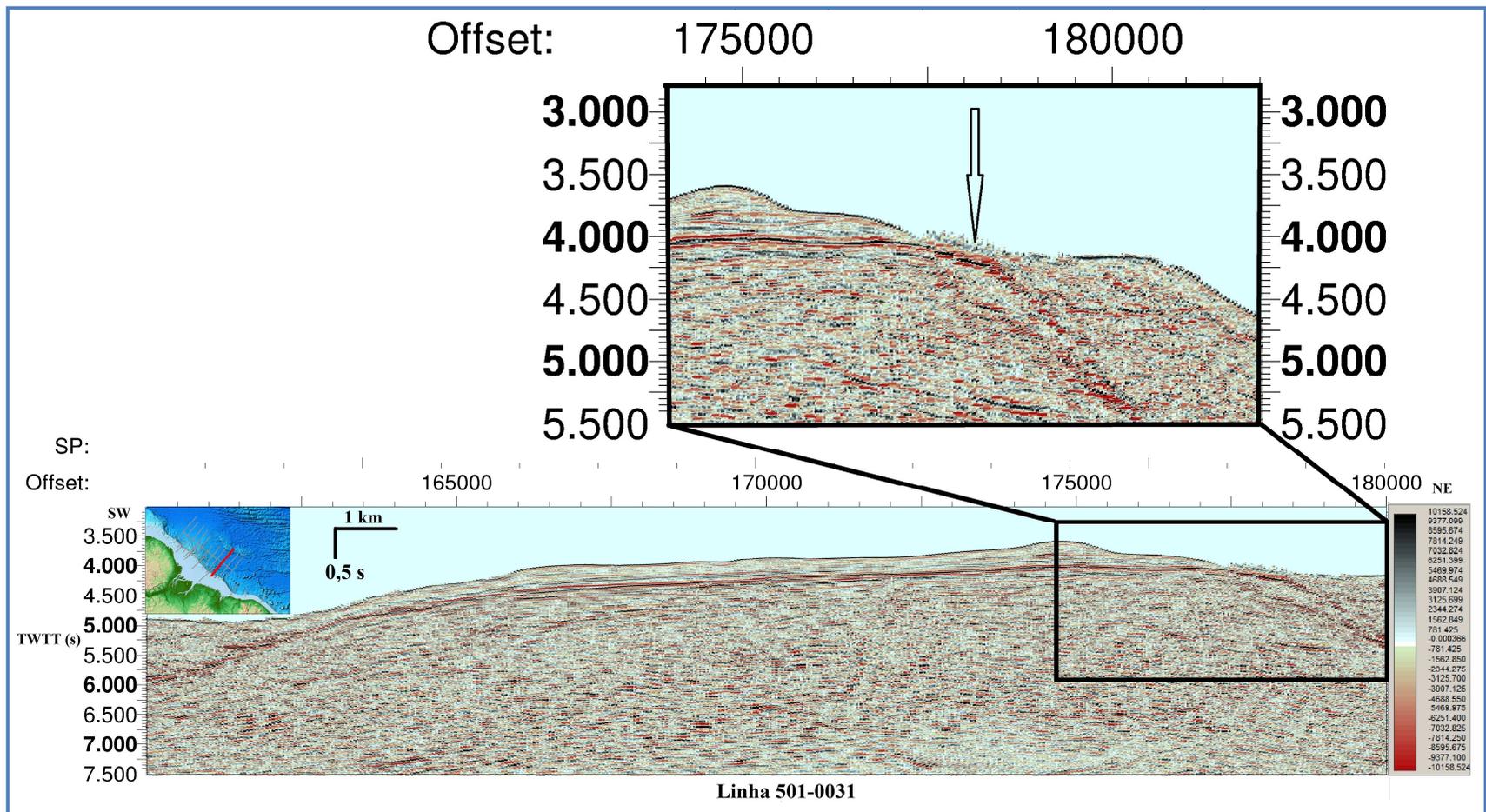


Figura 5.5: no enquadramento desse zoom a seta aponta para o que parece o fim do BSR que chega ao ponto mais próximo do fundo marinho em todo o trabalho. Além do padrão borrifado provavelmente proveniente de algum erro de processamento, nota-se que o fundo aparece levemente escarpado (*sharp*) por cerca de 1,5 km, sem as ondulações que aparecem ao longo do fundo até aquele ponto. Abaixo da seta, na medida do aumento de profundidade, acompanham o fundo marinho uma série de refletos com polaridade negativa, bastante descontínuos. Essa observação leva a sugerir uma incipiente base de estabilidade de hidratos de gás, interpretando que os refletos descontínuos seriam efeito da formação de novos nódulos de hidratos de gás que propiciam a cimentação a medida em que atingem a fase sólida.

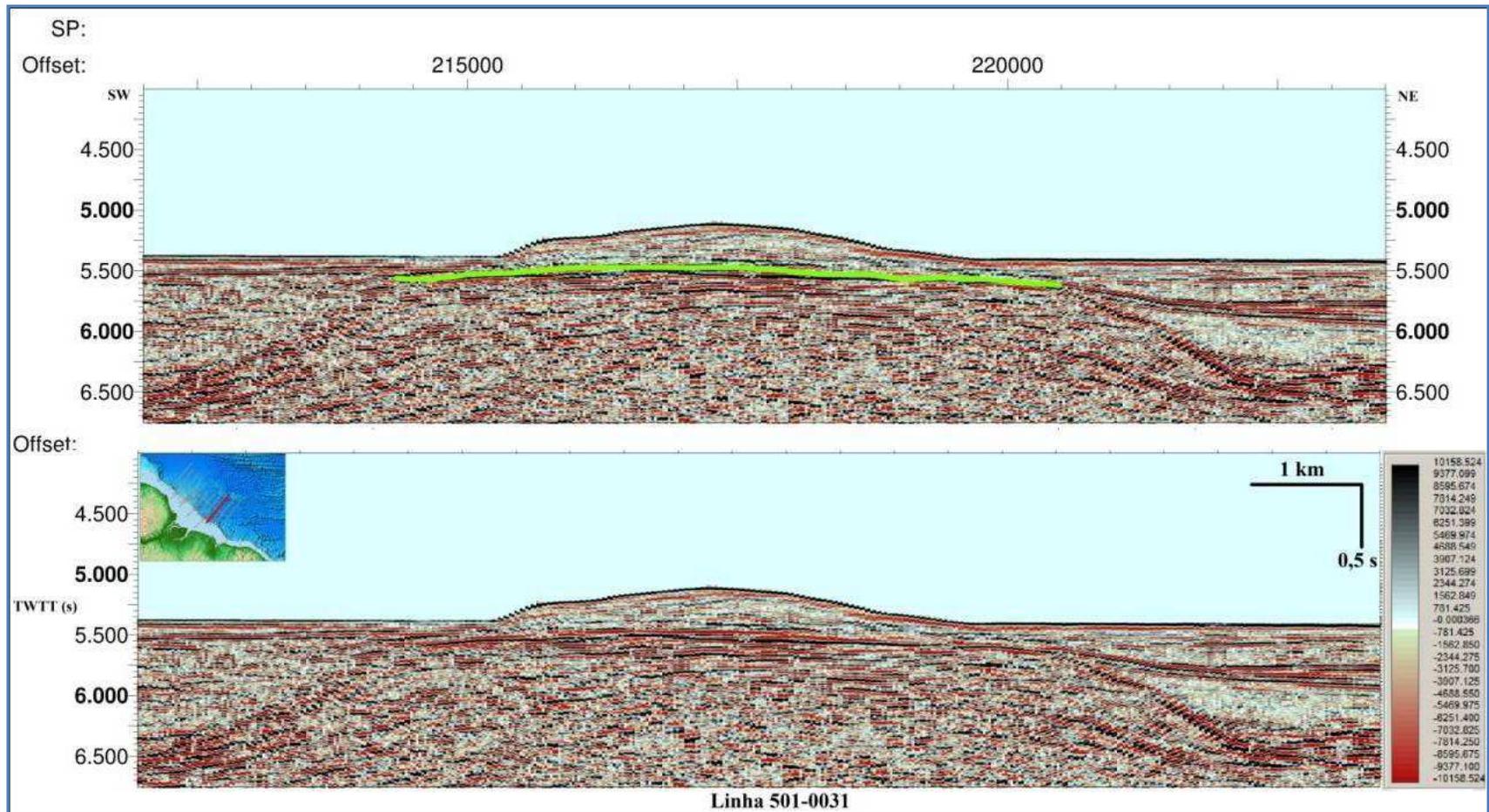


Figura 5.6: linha sísmica com interpretação do BSR marcado pelo horizonte em verde (parte superior da figura) e sem interpretação (parte inferior da figura). Neste segundo trecho da linha 501-0031, assim como no trecho anterior, o BSR também atravessa uma estrutura, ainda que esta esteja bem menos deformada do que as do setor Noroeste do Cone do Amazonas (Exagero horizontal = 2x)

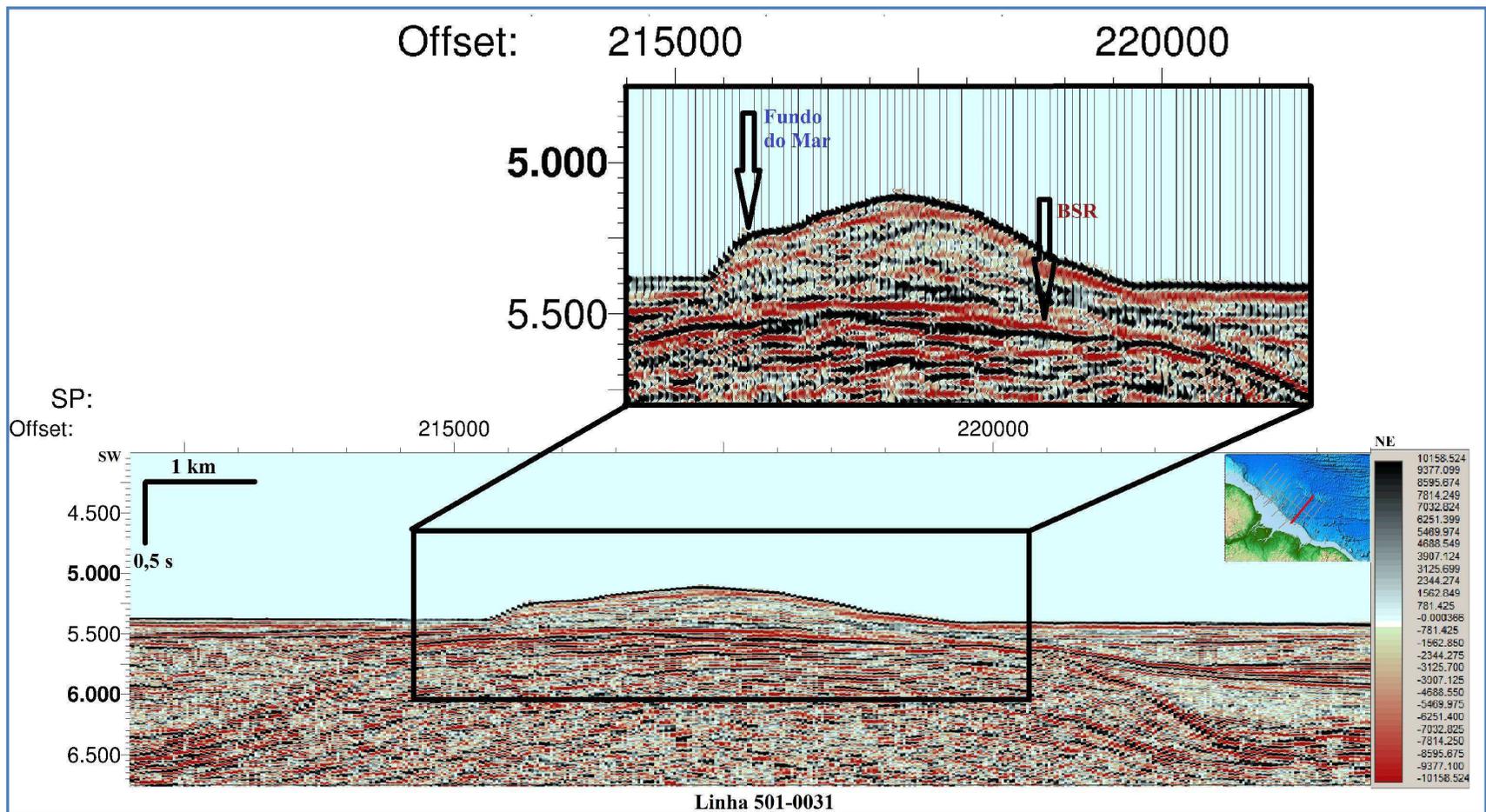


Figura 5.7: esta linha com o BSR interpretado, no quadro do zoom foi ativado o recurso wiggle trace para ressaltar o preenchimento das amplitudes de cada traço individualizado, ressaltando assim os refletores do fundo do mar e do BSR com polaridade positiva e negativa, respectivamente (Exagero horizontal = 2x)

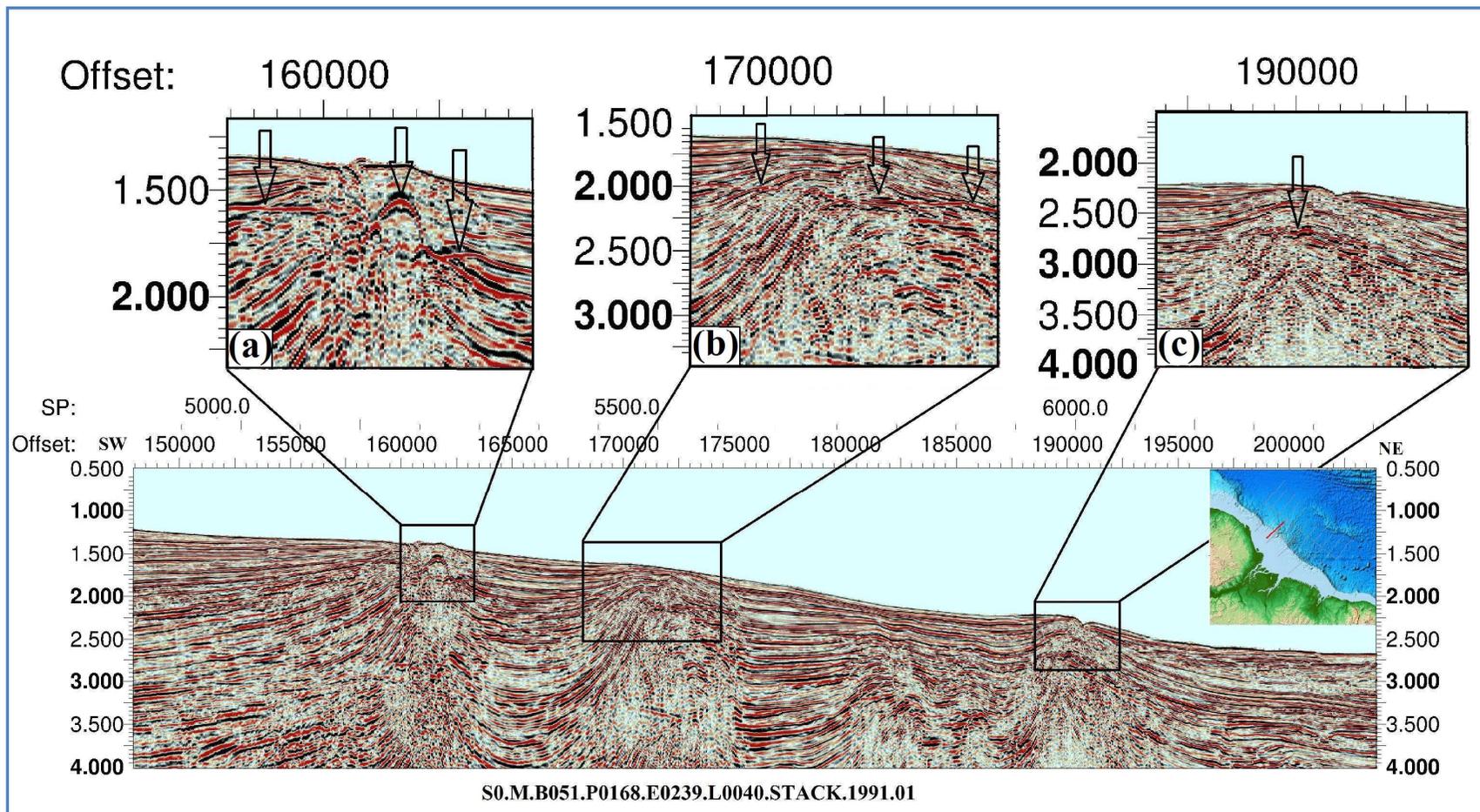


Figura 5.8: esta linha contém grandes estruturas compressivas onde o BSR é identificado por cruzar todo o estrato sedimentar deformado. a) O BSR que vinha acompanhando o fundo (1ª seta) quando sofre uma flexura ascendente (*pull up*) (2ª seta) por efeito da presença de fluidos termais, e depois segue sub-paralelo ao fundo. b) As três setas marcam pontos de truncamento do BSR através das camadas sedimentares dobradas. c) Neste ponto o BSR perde boa parte da sua amplitude, mas ainda sim se desenvolve sub-paralelo ao fundo marinho e segue cruzando camadas deformadas, nota-se que o fundo marinho está emborcado para baixo, indicando a possível incisão de um canal.

Os principais critérios para a identificação de BSR foram utilizados em todos os perfis, muito embora o aspecto blindado (*blanking*) não tenha sido tão bem notado. Os refletores interpretados como BSRs estão abaixo de lâminas d'água que variam aproximadamente entre 0.38 – 5.3 s em tempo duplo (TWTT), e assumindo uma velocidade de 1500 m/s para a velocidade da onda sísmica no mar, deduz-se uma profundidade que varia entre 285-3975 metros aproximadamente. Considerada a partir da marcação do BSR até a superfície do fundo do mar, a espessura máxima em tempo varia entre 0.10 – 0.25 s em tempo duplo (TWTT) aproximadamente, e adotando a velocidade sônica média dos sedimentos contendo hidratos de gás de 2.300 m/s (Tanaka, 2003) a espessura em varia de 115 – 287 metros aproximadamente.

As duas linhas (501-0025A e S0.M.B051.P0168.E0239.L0040.STACK.1991.01) representadas nas figuras 5.1, 5.2 e 5.8 onde o BSR foi identificado dentro de um contexto geológico com deformações mais expressivas estão localizadas no setor Noroeste do Cone do Amazonas, enquanto na linha 501-0031 do setor Sudeste (figura 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7) o BSR aparece numa profundidade maior e as camadas sedimentares não apresentam grandes deformações.

Os polígonos de ocorrência estão plotados de amarelo no mapa da figura 5.9. É justo comentar que os polígonos são meramente ilustrativos, usados apenas para localizar as ocorrências no Cone do Amazonas, mas não representam a área espacial real em que se infere a ocorrência de hidratos de gás, de tal forma que a malha de linhas sísmicas é muito esparsa e os polígonos acabam sendo extrapolações em vez de gridagens calibradas por dados.

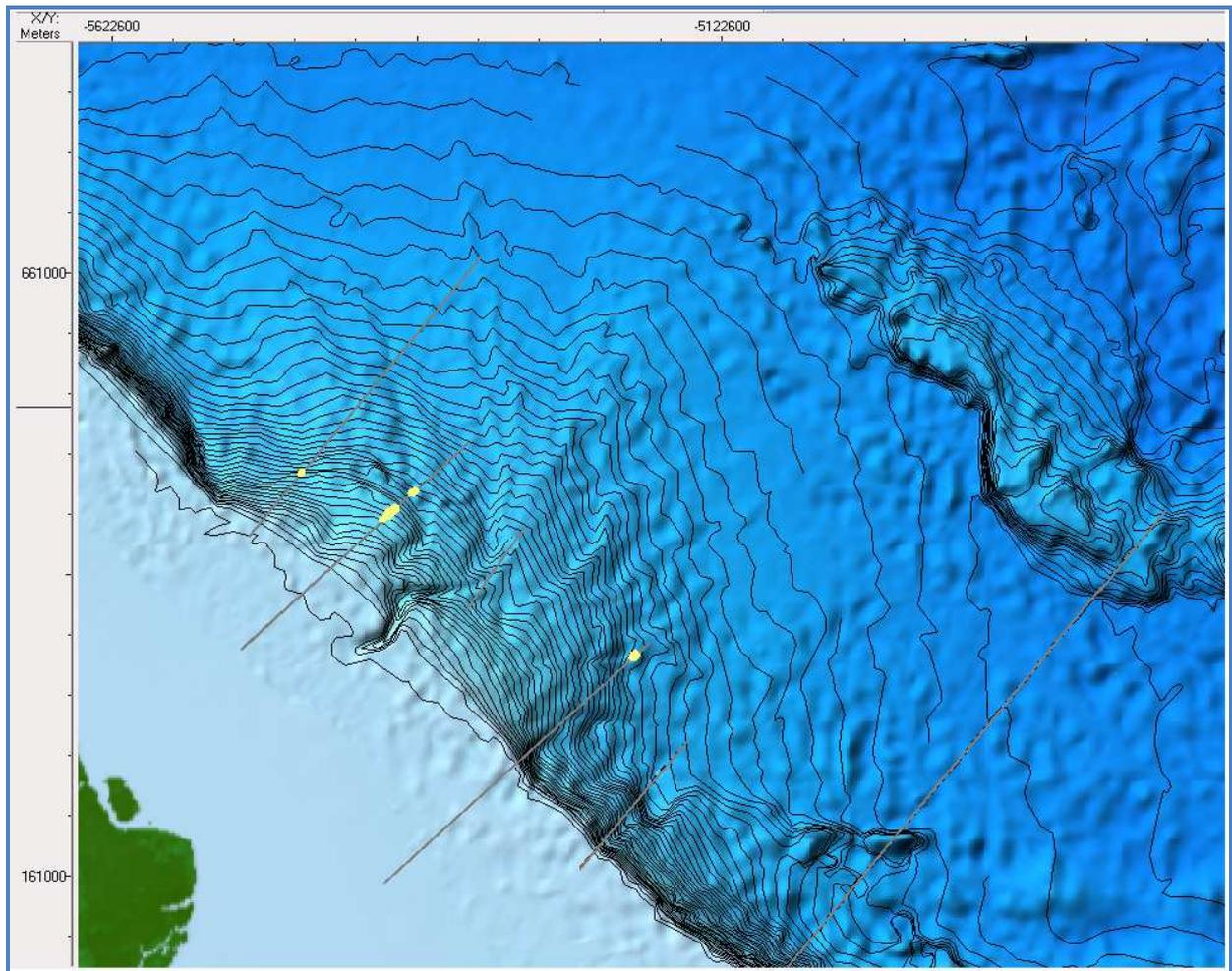


Figura 5.9: Mapa de localização dos polígonos de ocorrência de hidratos de gás.

## 5.2. Average Energy

Uma das finalidades na aplicação de atributos sísmicos é a caracterização de padrões e tendências não evidentes no perfil sísmico de amplitude. No caso do atributo de *average energy* o que se espera é recuperar a energia média do traço empilhado (*stacked*), que tem uma relação direta com a média das amplitudes, esta recuperação de amplitude foi mais bem observada nas figuras 5.10 e 5.11. Nas demais figuras (5.12 e 5.13) o atributo ressaltou as anomalias de amplitude dentro do contexto geológico de cada linha. Neste caso, não se trata de um atributo instantâneo, ou seja, o atributo não é aplicado a cada tempo do traço, mas sim em uma janela de tempo que representa uma energia média do sinal sísmico, e justamente por ser uma média ele tende a ser uma técnica de suavização. É justamente essa janela de tempo que dá ao dado esse aspecto de “pigmentação”, e o incremento de tempo do algoritmo deste atributo foi do padrão dado pelo software SMT Kingdom, de maneira que não se verificou com mais detalhe a sua influência sobre a detecção de hidratos. Geralmente este atributo é utilizado em paralelo ao atributo “*coherency*”, pois suas anomalias se associam a perda de energia por espalhamento (*scatter*) ou absorção para delinear anomalias e tendências, de qualquer maneira os autores têm encontrado resultados em que anomalias em torno de 1% na perda de energia já é relevante para a interpretação.

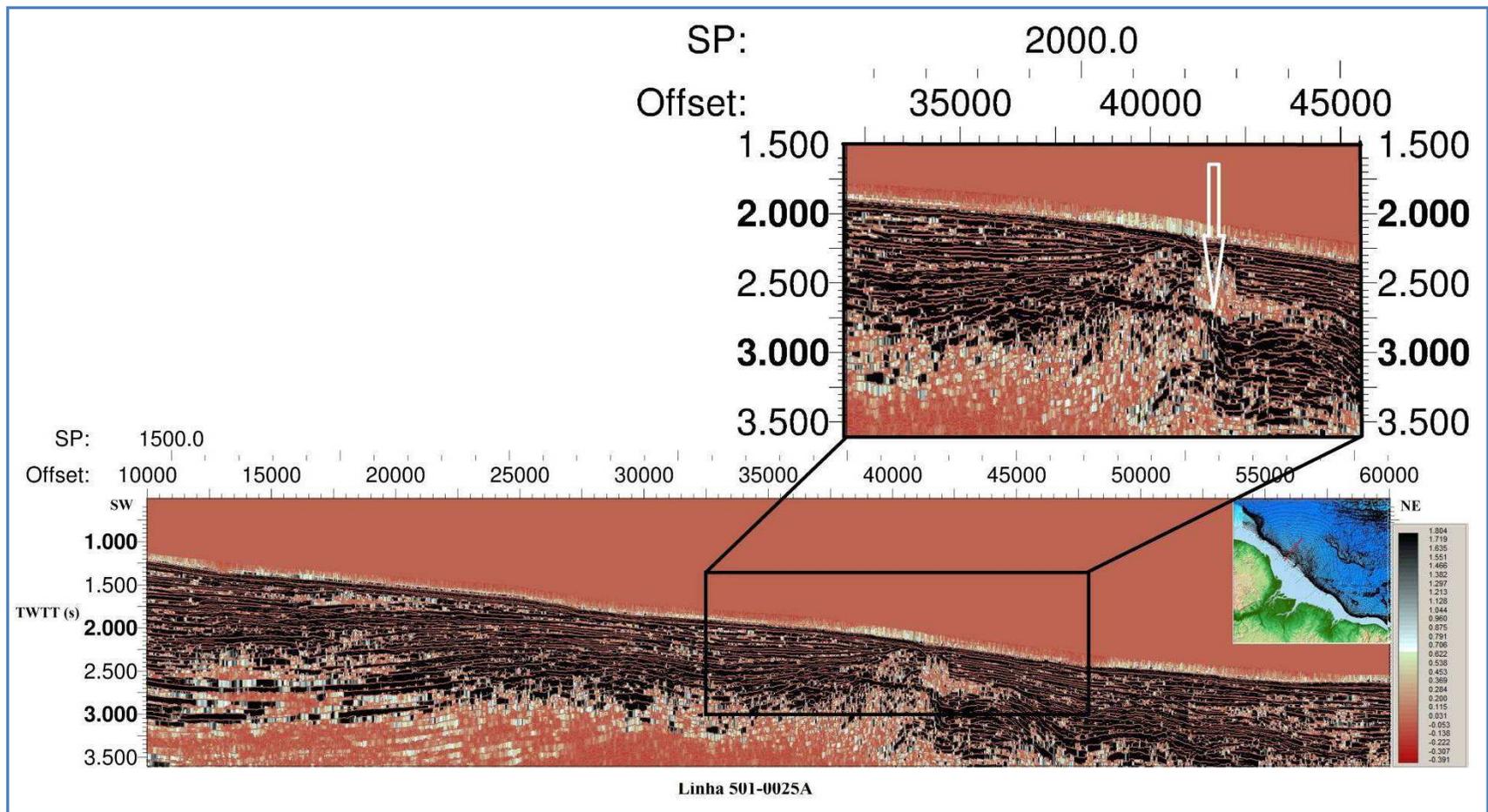


Figura 5.10: atributo average energy, o zoom com enquadramento na estrutura onde foi identificado o BSR mostra que o atributo recupera a amplitude do BSR que mal era notada no perfil de amplitude da figura 5.1, permitindo uma boa visualização da sua extensão (seta branca). O critério prétero da polaridade do refletor em relação ao fundo marinho é imprescindível pois neste atributo não se pode notar tão bem o truncamento do BSR em relação à esturutura deformada.

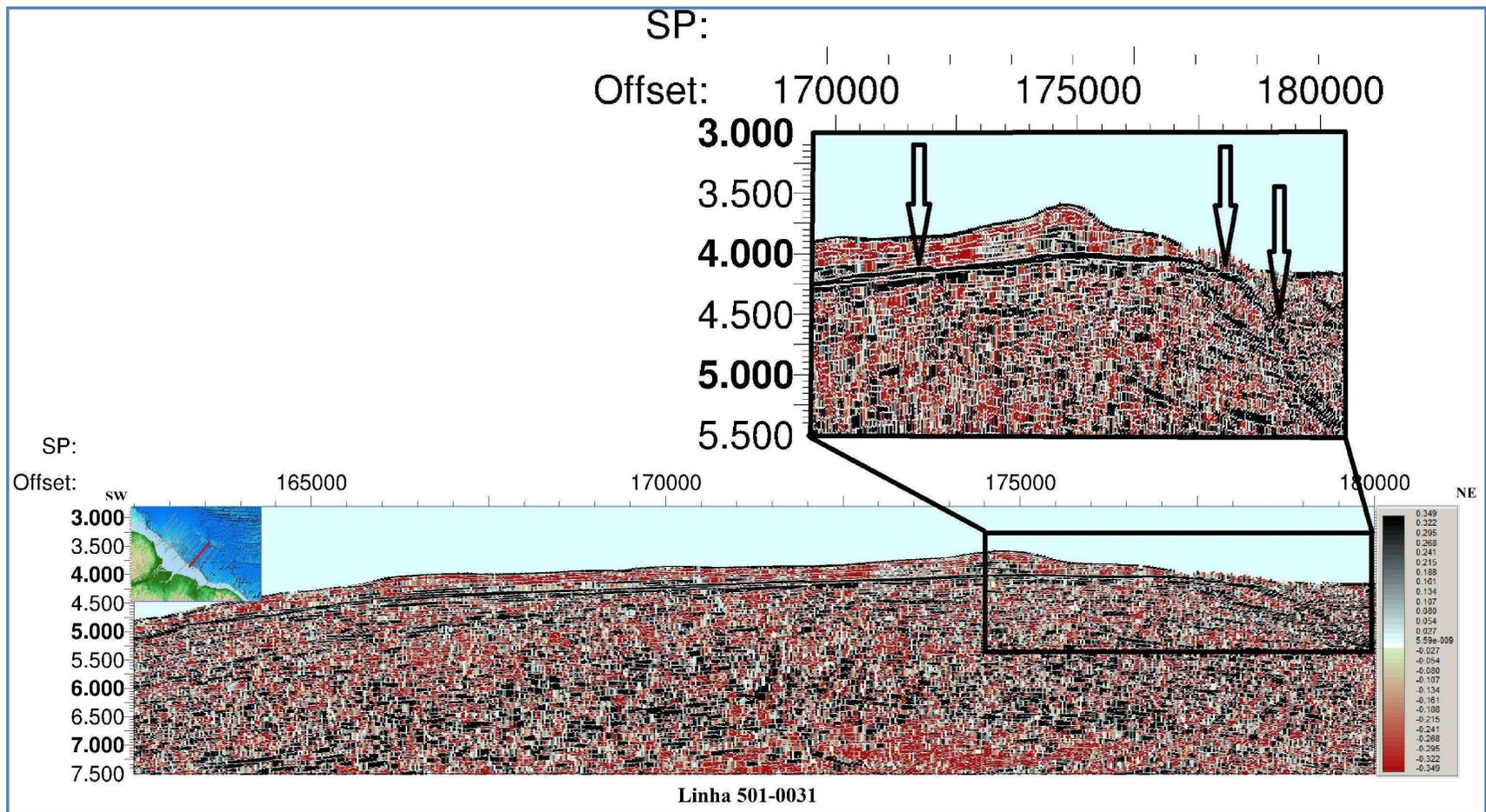


Figura 5.11: atributo average energy, aqui nota-se que o atributo propicia a recuperação da amplitude, e o janelamento do algoritmo do atributo permite uma maior coesão das reflexões do BSR, antes pouco notadas e esparsas, dando uma melhor noção da sua continuidade lateral.

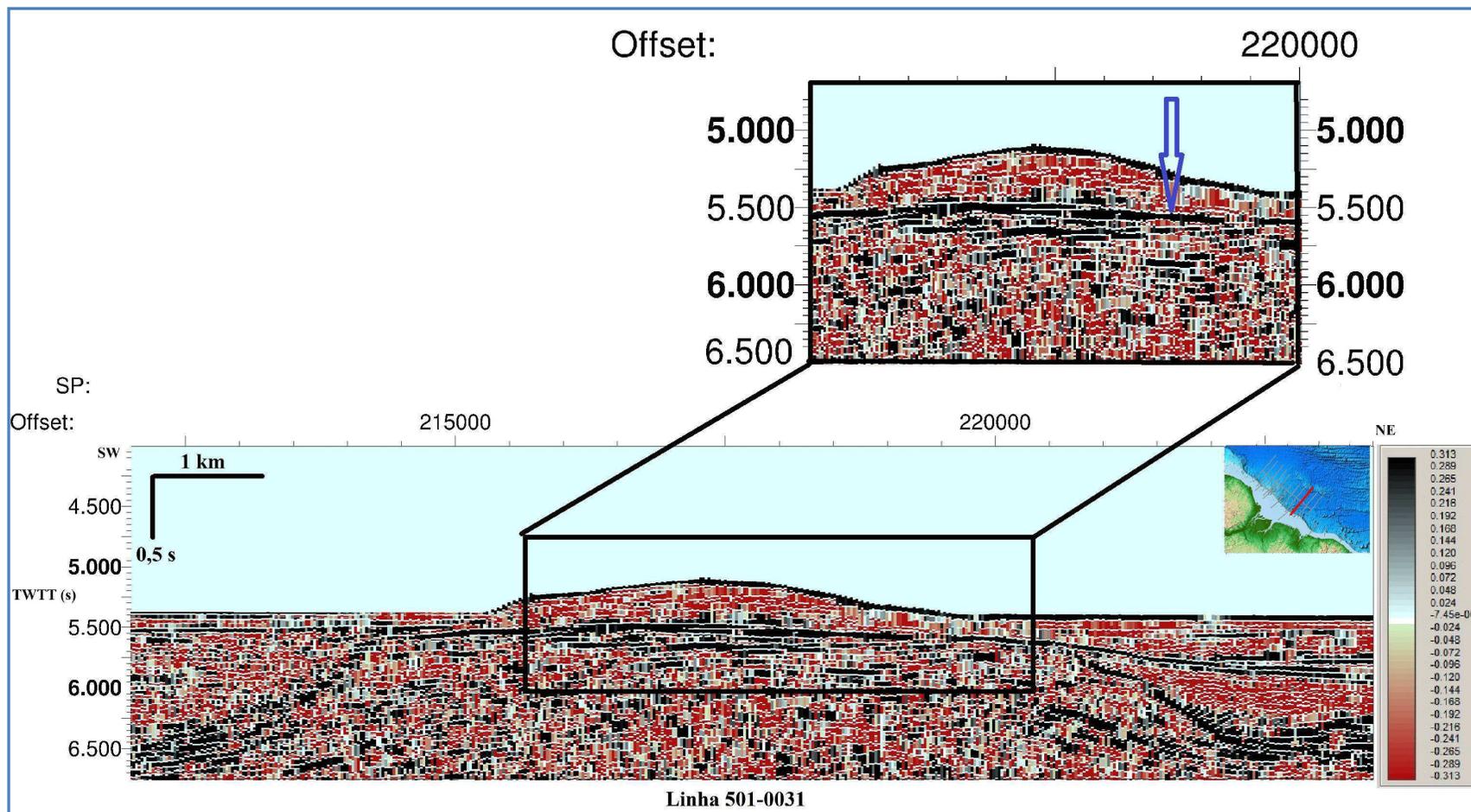


Figura 5.12: atributo average energy, o zoom (2x) enquadrado na estrutura mostra que o atributo resalta a magnitude da reflexão do BSR (seta azul) que aparece muito maior do que a do fundo, além de amostrar bem a sua continuidade lateral, permitindo assim uma avaliação qualitativa dessa zona de hidratos enquanto selante.

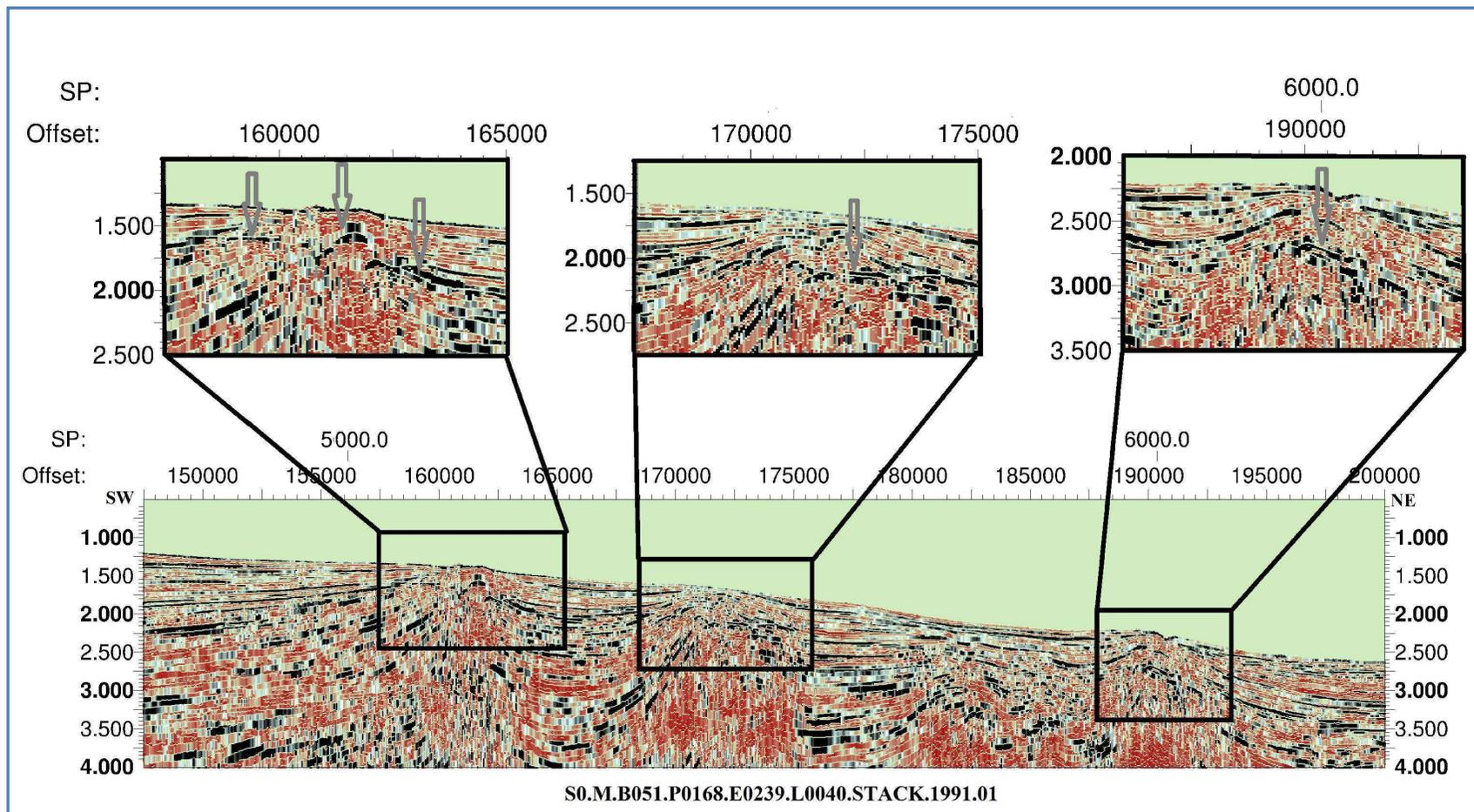


Figura 5.13: atributo average energy, destaca-se neste atributo os BSRs como altas reflexões em relação ao fundo marinho. Nessa linha os BSRs interpretados eram efêmeros (setas cinzas), sem continuidade lateral.

### **5.3. Envelope**

O atributo sísmico de envelope é uma representação da energia instantânea total e possui uma relação direta com o contraste de impedância acústica, individualizando o contraste de cada interface. O fato do BSR geralmente apresentar reflexões fortes torna o atributo sísmico de envelope um bom candidato para a caracterização de hidratos de gás.

Tendo em vista as propriedades geológicas da zona de estabilidade dos hidratos de gás é possível considerar que essa zona de estabilidade funciona como um selante para gases livres provenientes de zonas mais profundas.

O alto contraste de impedância acústica proporcionado pelo transiente de velocidades dos hidratos de gás (2250 m/s) e velocidades próximas de 1660 m/s para sedimentos abaixo dessa zona de estabilidade, geralmente atribuída a gases livres, seria um bom indicativo da presença de hidratos (Tinivella, 2008). Em teoria espera-se que o atributo sísmico de envelope venha a destacar o alto contraste de impedância acústica, evidenciando assim o próprio BSR, ou ainda, dando um indicativo de possíveis novas zonas de estabilidade de hidratos de gás.

Numericamente os resultados deste trabalho mostram que os valores de energia instantânea do BSR chegam a ser 26 vezes maiores do que o as camadas sedimentares sobrejacentes ou sotopostas (figura 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18).

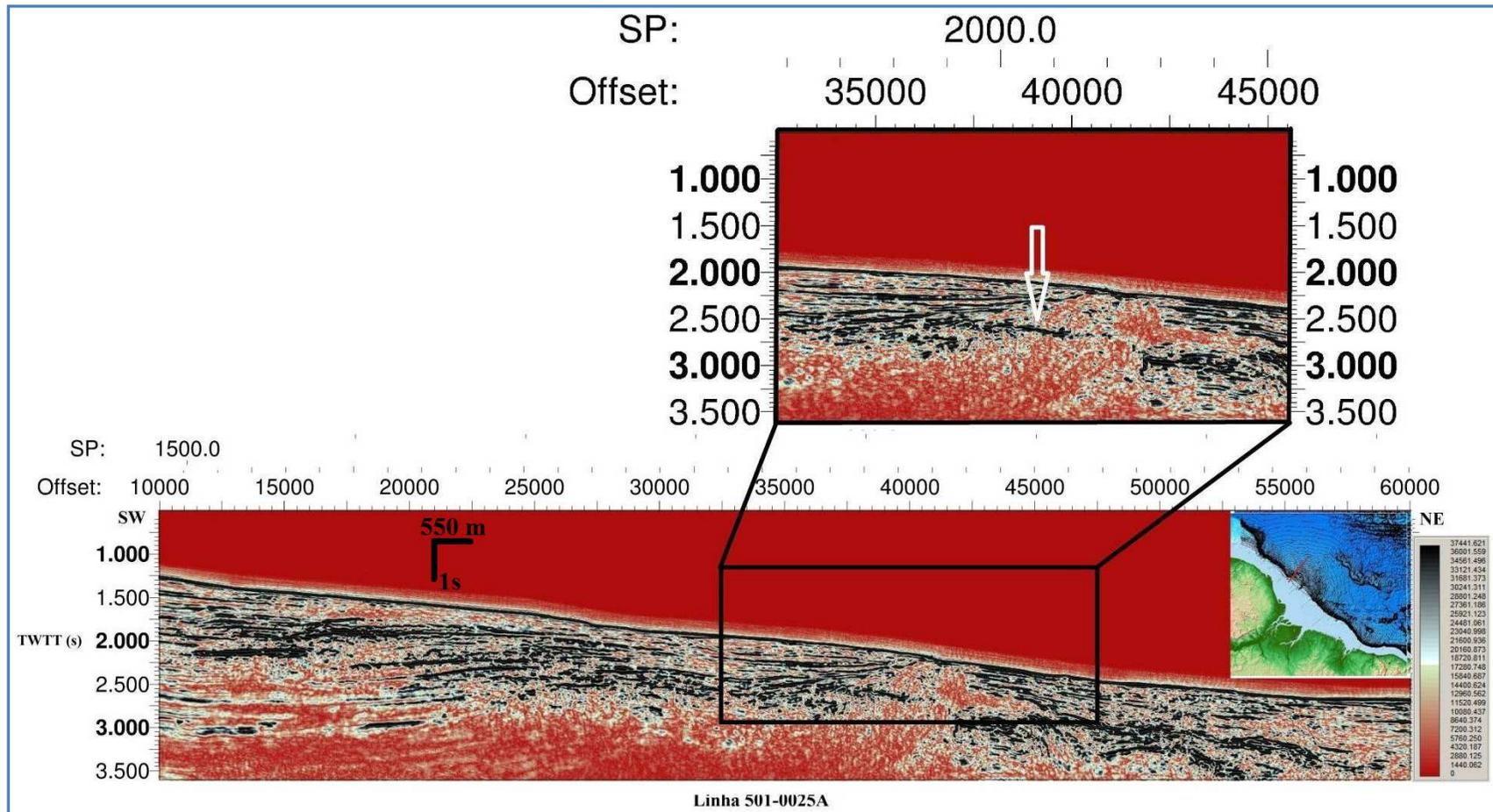


Figura 5.14: atributo envelope, a alta energia instantânea está representada pelo espesso traço preto apontado pela seta branca. Note que praticamente não há registro da energia instantânea dos refletores da estrutura aonde o BSR está inserido, essa seria mais uma evidência que explicaria a apresença de gás livre em abundância na estrutura.

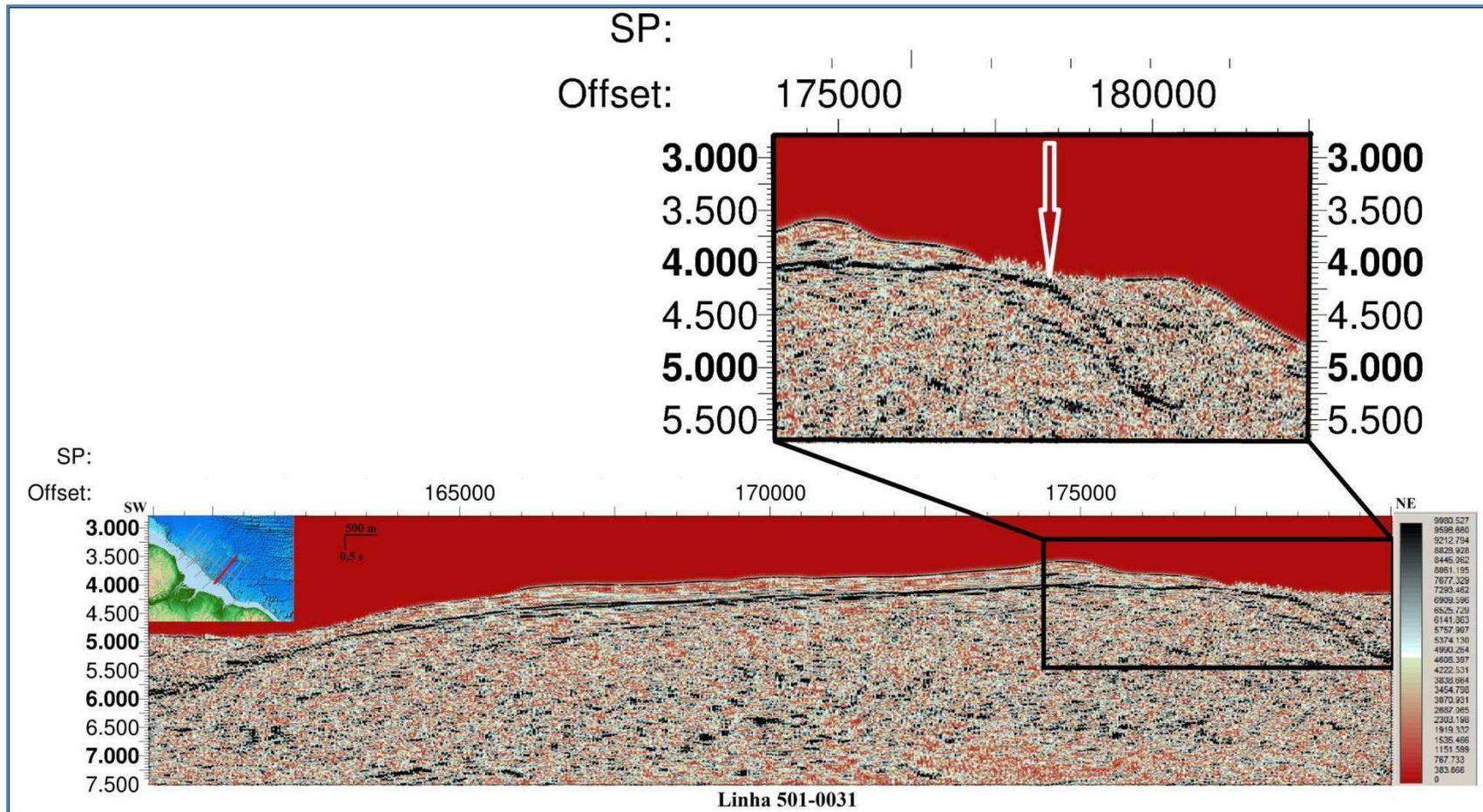


Figura 5.15: atributo envelope, nesta linha seta aponta para a alta energia instantânea que segue no espesso traço preto até quase se encontrar com o fundo marinho. Observa-se também que a alta energia instantânea segue marcada para baixo de uma zona erodida onde possivelmente o hidrato estaria se consolidando para formar uma nova zona de estabilidade.

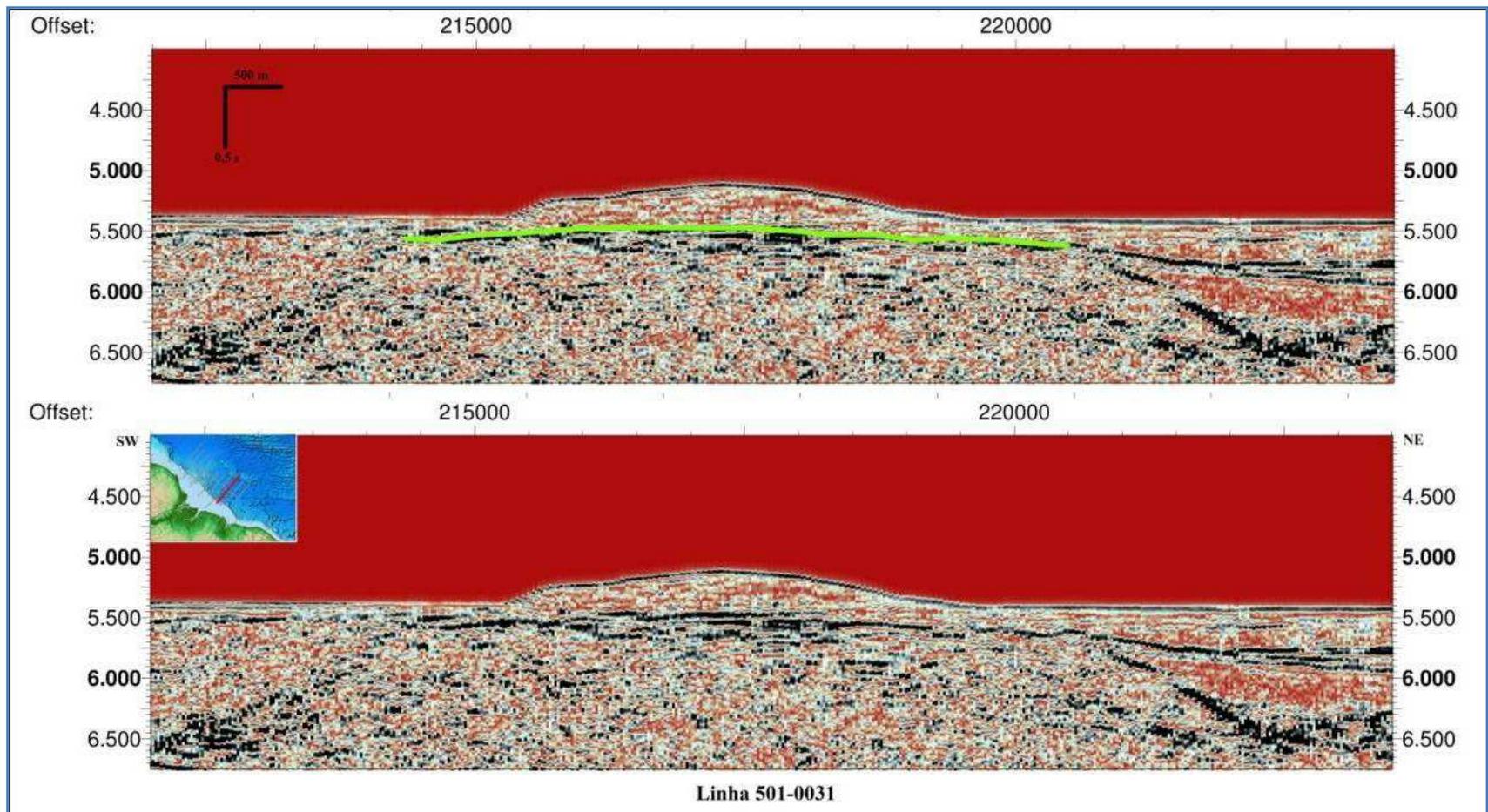


Figura 5.16: atributo envelope, no perfil inferior observa-se o espesso traço representando a alta energia instantânea do BSR indicado pelo horizonte verde na figura superior. Nota-se que este atributo não pode responder ao critério de polaridade negativa, já que ele só está associado ao coeficiente de energia instantânea da reflexão. Por esse atributo se obtém um critério que é inclusivo, mas não exclusivo.

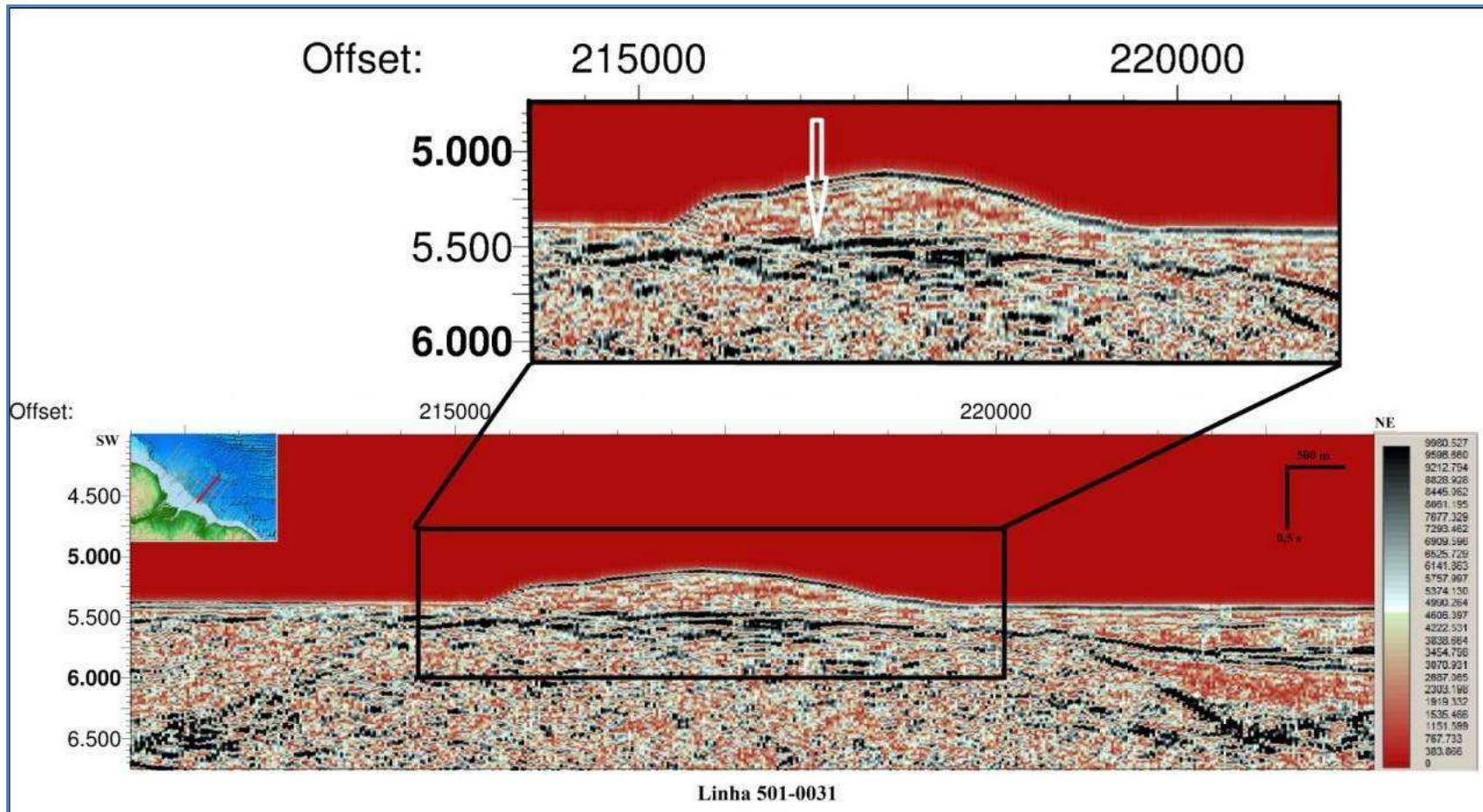


Figura 5.17: atributo envelope, a seta aponta para uma das zonas de alta energia instantânea, mas observa-se também outras zonas abaixo desta. Isso ilustra que neste caso o critério estabelecido para a identificação de hidratos de gás através do atributo envelope não pode ser único, e a interpretação deve ser usada em concomitância com outros atributos que permitam avaliar outros critérios.



#### 5.4. Fase Instantânea

A importância da fase instantânea está fundamentalmente ancorada no entendimento sobre as propriedades petrofísicas das rochas, e foi essa premissa que orientou quanto a escolha deste atributo.

Hidratos de gás encontrados em suas zonas de estabilidade comumente atuam na cimentação dos sedimentos aonde se alojam, essa cimentação por sua vez diminui sensivelmente os contrastes de impedância acústica entre as camadas com diferentes texturas, impondo dessa forma um aspecto blindado, efeito da polarização da fase (figura 5.19 e 5.20). Ratificando que o desenvolvimento no cálculo do atributo de fase instantânea se dá no âmbito da extração de componentes após a transformada de Hilbert, entende-se que este atributo possui a característica de ser independente da amplitude.

A independência da amplitude foi o que tornou o atributo de fase instantânea atrativo para a identificação de hidratos de gás no Cone do Amazonas porque outros dois atributos, Envelope e *Average Energy*, eram fundamentalmente dependentes da amplitude; e a Frequência Instantânea seria uma derivação da própria Fase Instantânea. A partir disso, o critério buscado nos padrões sísmicos que estaria relacionado à ocorrência de hidratos de gás é o *blinking*. Aplicando-se o atributo de fase instantânea, foi possível identificar as regiões aonde não se consegue identificar nenhuma terminação do refletor, ou por vezes nem mesmo a amplitude, destacando assim uma possível zona de estabilidade de hidratos de gás.

Nas regiões aonde as camadas sedimentares são deformadas, o atributo auxiliou na visualização das terminações dos HGs (figura 5.19, 5.20, 5.21 e 5.22) pelo bom destaque dos truncamentos, e onde não havia deformações mais expressivas, com estratificação quase plano-paralela, a utilização do atributo de fase instantânea foi de grande utilidade para denotar a continuidade lateral do BSR.

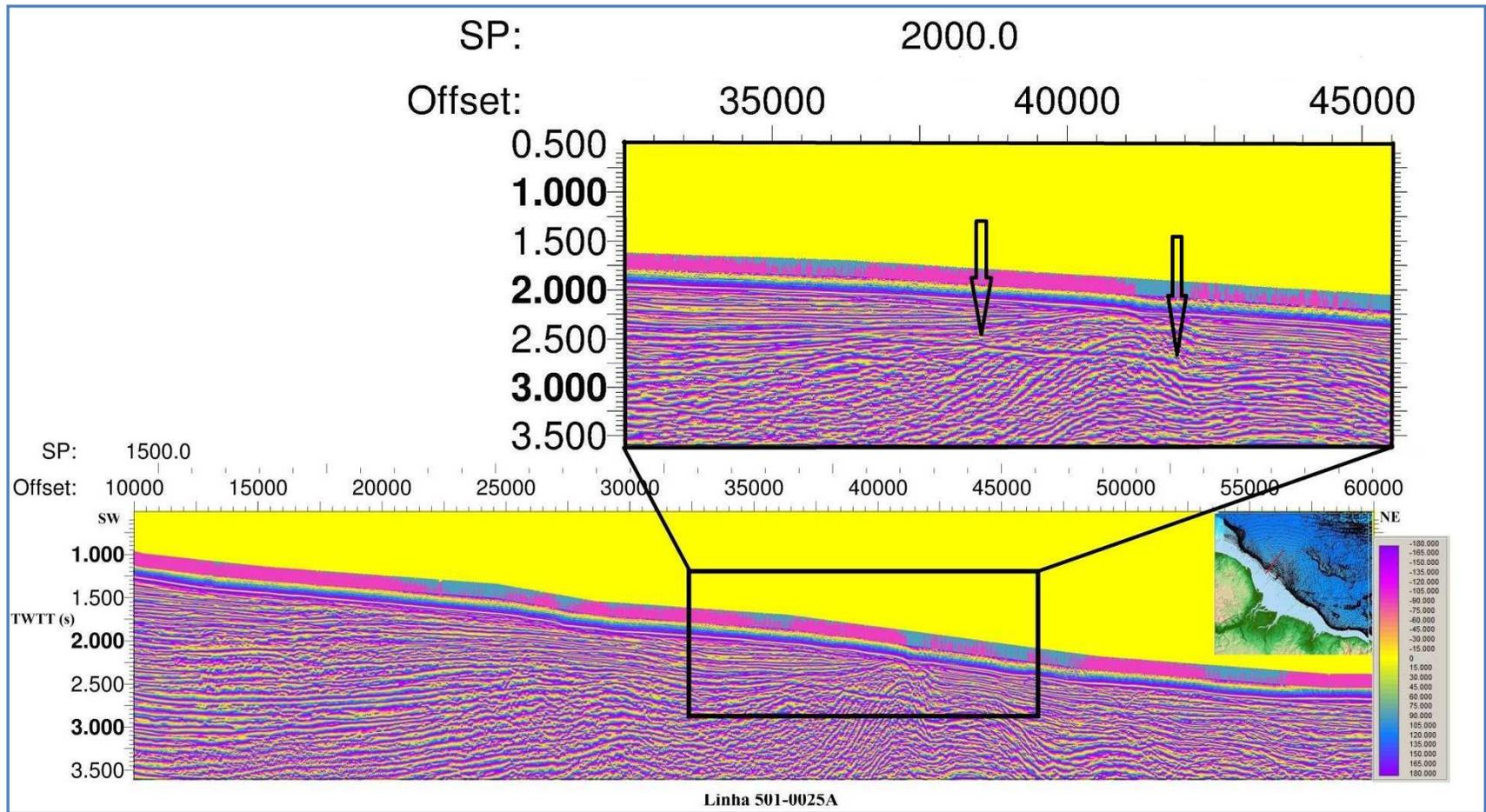


Figura 5.19: fase instantânea, nesta linha observa-se os truncamentos que são apontados pelas setas nas terminações dos hidratos, permitindo uma boa delimitação da sua extensão.

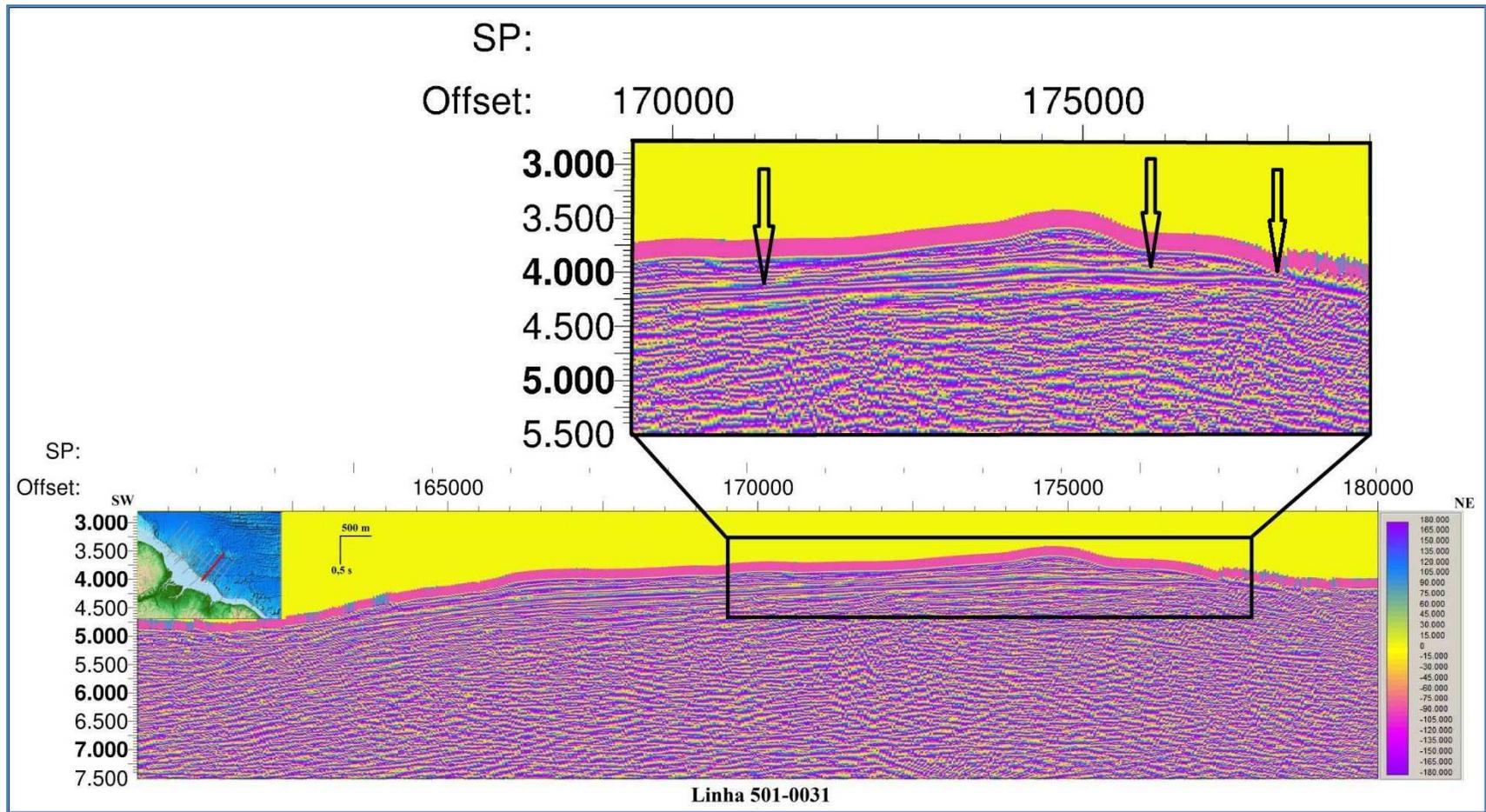


Figura 5.20: fase instantânea, aqui a continuidade lateral é destacada pelas duas setas colocadas nos dois picos do range de fase ( $180^0$  a  $-180^0$ ), a última seta localizada à direita mostra o truncamento que quase chega ao encontro do refletor do fundo marinho.

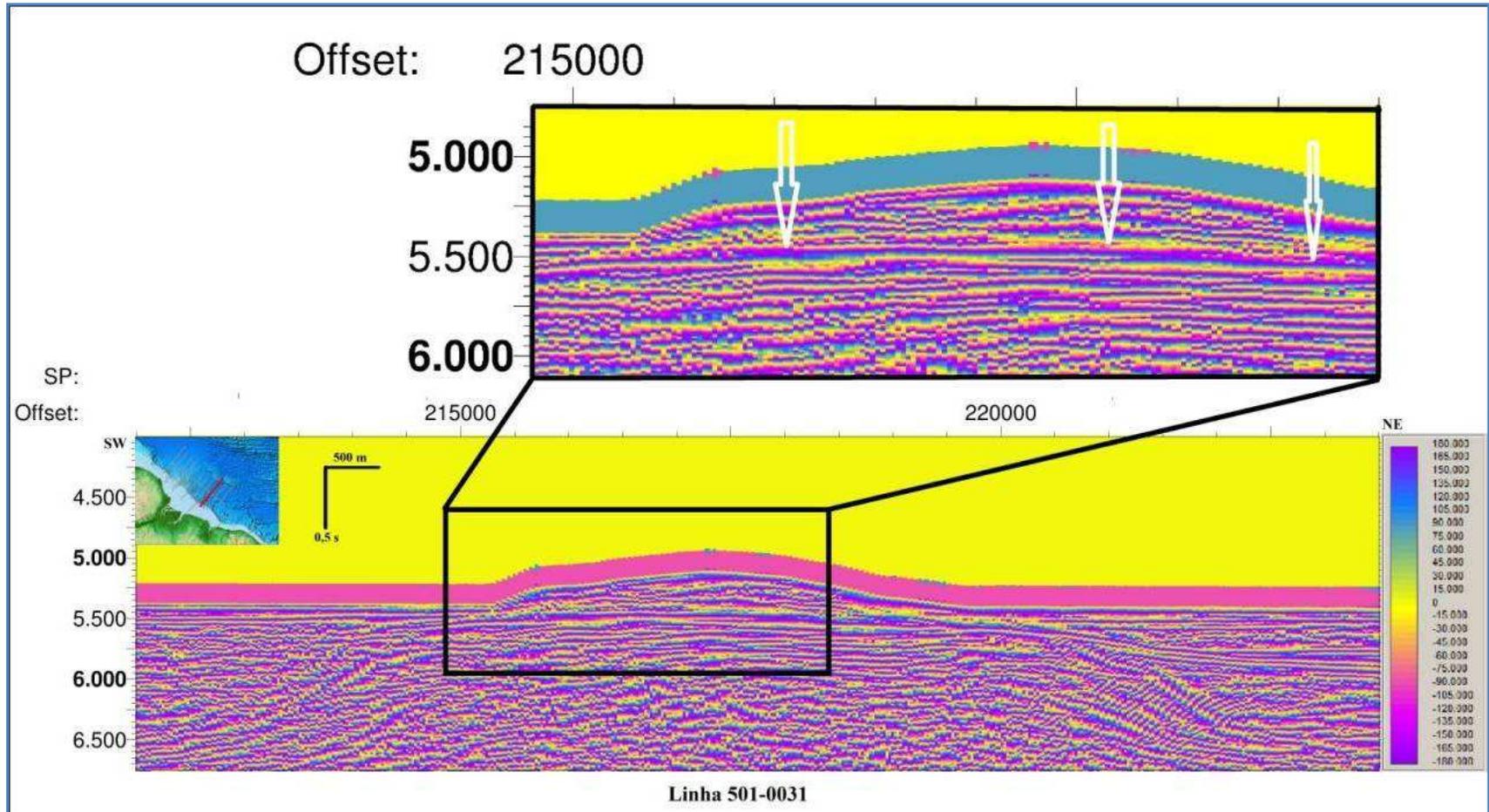


Figura 5.21: fase instantânea, neste trecho da linha as setas sequencialmente apontam para a mudança de fase de  $180^{\circ}$  do azul marinho passando a  $0^{\circ}$  na cor amarela e chegando a  $-180^{\circ}$  na cor roxa, na interface com a zona livre de gás. O atributo enfatiza a facilidade de visualização da continuidade lateral do BSR.

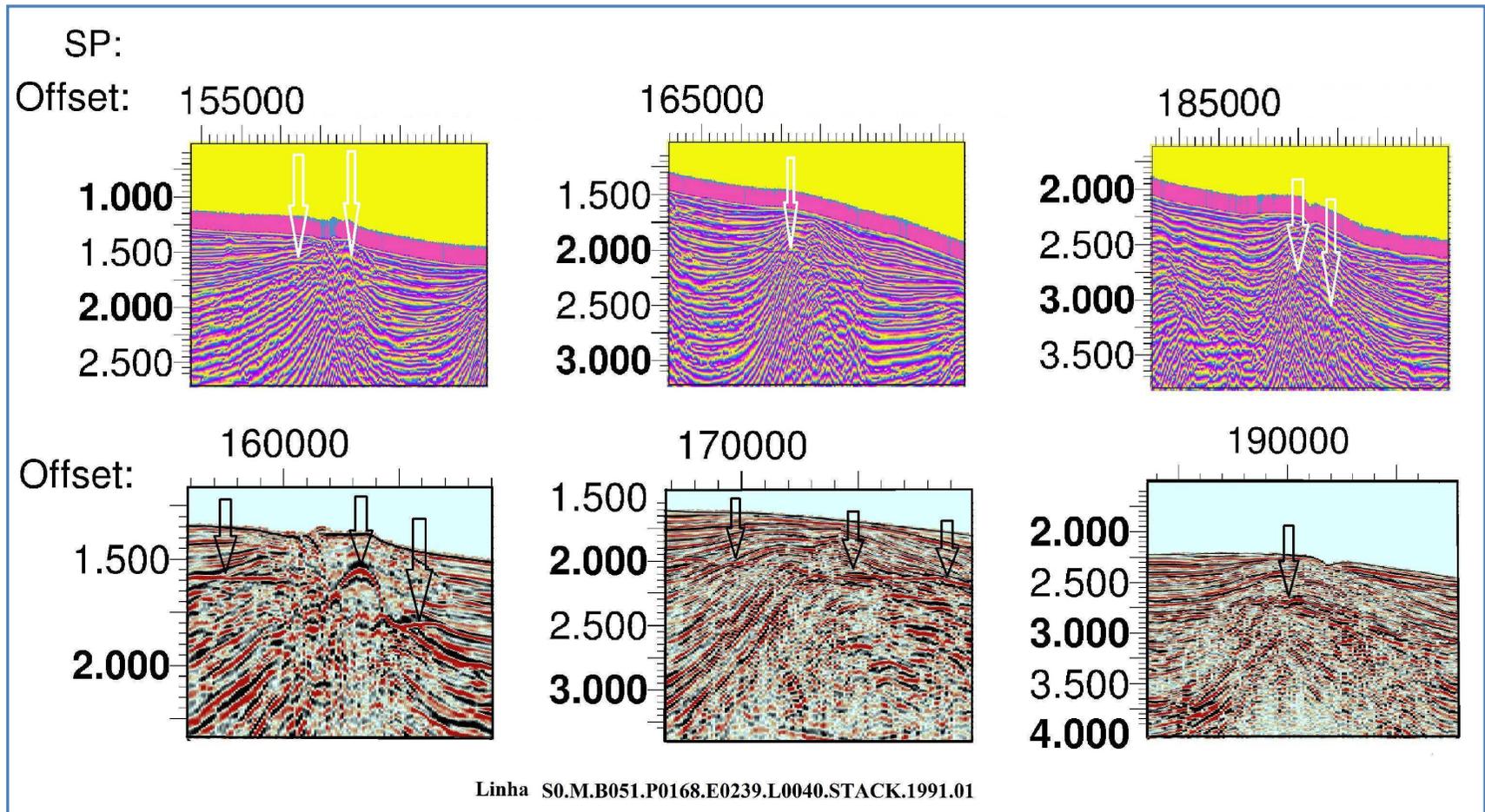


Figura 5.22: fase instantânea, todas as setas brancas apontam para truncamentos que se tornaram claramente visíveis nas terminações do BSR no perfil do atributo, alguma terminações passariam despercebidas no perfil de amplitudes.

## 6. Conclusão

Uma vez que sejam aplicados atributos a um dado sísmico os critérios para inferir a ocorrência de hidratos de gás não podem ser os mesmos observados no perfil sísmico com amplitudes. Cada atributo extrai características físicas intrínsecas ao dado sísmico que pode ser manipulado matematicamente para revelá-las, mas para isso é preciso entender o funcionamento do método para adotar critérios próprios para a análise de cada atributo, assim como notar o contexto geológico no qual o hidrato está inserido deve balizar o estudo e acrescentar ressalvas para as respectivas limitações. De maneira geral a aplicação de atributos sísmicos deu grande suporte para a caracterização e delimitação dos polígonos de ocorrência dos hidratos de gás, mitigando incertezas e suposições na identificação dos mesmos.

A contribuição do atributo de Envelope foi realçar o refletor associado ao hidrato em detrimento das reflexões com baixa energia instantânea do contexto geológico adjacente, permitindo uma comparação qualitativa entre o contraste de impedância do BSR e de outros refletores. Além disso, por ser um atributo instantâneo intimamente ligado ao contraste individual de impedância acústica de cada interface ele pôde ser usado para estimar a espessura dos hidratos de gás.

O atributo de Average Energy permitiu recuperar amplitudes de alguns refletores potencialmente valiosos dentro do contexto geológico local, viabilizando a inferência o início do estabelecimento de uma nova zona de estabilidade de hidratos de gás. Apesar de se tratar de um atributo de suavização, pelo seu algoritmo computar valores médios, é possível estimar qualitativamente o nível de eficiência do hidrato enquanto selante.

A Fase Instantânea serviu para identificar *blankings* não visíveis até então nos perfis de sísmica, e ainda a sua colaboração foi ímpar para identificar os truncamentos nas terminações e auxiliar na delimitação dos polígonos de ocorrência de hidratos de gás. Nos locais onde as camadas sedimentares estavam plano-paralelas ao BSR a Fase Instantânea realçou a continuidade lateral das ocorrências de hidratos de gás.

Conclui-se que é válida a aplicação de todos os atributos sísmicos apresentados neste trabalho no que tange a identificação de hidratos de gás, sendo cada qual utilizado com critérios específicos, observando a natureza de cada um; e conclui-se a complementaridade das interpretações na análise geral.

## Referências Bibliográficas

- Araújo, E. F. S, Silva, C. G; Reis A. T.; Perovano, R.; Gorini, C., Vendeville, B. C. & Albuquerque, N. C. 2009. Movimentos de massa multiescala na Bacia da Foz do Amazonas – Margem Equatorial Brasileira. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol 27(3): 485–508.
- Azevedo, R. P. *Tectonic evolution of brazilian equatorial continental margin basins*. University of London, Imperial College, London, Tese de Doutorado, p. 455, 1991.
- Azevedo, R. P. (1992). Evolução Tectônica da Margem Continental Equatorial Brasileira. Congresso Brasileiro de Geologia, 37, São Paulo, 1992. Boletim de Resumos Expandidos. São Paulo, SBG. V. 1 (Simpósios), p. 565.
- Barnes, Arthur E. Instantaneous spectral bandwidth and dominant frequency with applications to seismic reflection data. *Geophysics*, Québec, v. 58, n. 3, p.419-428, 19 Mar. 1993.
- Barnes, A. Seismic attributes in your facies: CSEG Recorder, vol: 26, p. 41 - 47, 2001.
- Barros, C. S. Análise de Atributos Sísmicos para Caracterização de Hidratos de Gás no Cone do Amazonas. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Curso de Geofísica, LAGEMAR, UFF, Rio de Janeiro, 2009.
- Bizzi, L. A.; Schobbenhaus, C.; Vidotti, R. M. e J. H. Gonçalves (eds). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Bacias Sedimentares da Margem Continental Brasileira*. CPRM, Brasília, p. 130-132, 2003.
- Baptista, J. M. M. Análise da Formação de Hidratos em Atividades de Perfuração de Campos Petrolíferos, Monografia do Projeto Final de Curso, UTFPR, Campos Curitiba, Brasil, 2007.
- Brandão, J. A. S. L. & Feijó, F. J. 1994. Bacia da Foz do Amazonas. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v.8 (1), 91-99.
- Brown, A. R. Seismic attributes and their classification. *The Leading Edge*, v15, p. 10, 1996.
- Brown, Alistair R. Understanding seismic attributes. *Geophysics*, Dallas, v. 66, n. 1, p.47-48, 20 Jan. 2001.

- Brown, L.T., T.L. Davis, and M. Batzle, 2002, Integration of rock physics, reservoir simulation, and time-lapse seismic data for reservoir characterization at Weyburn Field, Saskatchewan Society of Exploration Geophysicists. SEG Expanded Abstracts 21, pp. 1708–1711.
- Chappellaz, J., Barnola, J., Raynaud, D., Korolkevitch, Y., Lorius, C., 1990. Ice core Record of atmospheric methane over the past 160,000 years. *Nature* 345, 127–131.
- Chopra, S., and K. J. Marfurt, 2005, Seismic attributes - A historical perspective: *Geophysics*, 70, 3SO-28SO.
- Clennell, M. B., 2000. Hidrato de Gás Submarino: Natureza, Ocorrência e Perspectivas para a Ocorrência na Margem Continental Brasileira. *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 18(3), 2000.
- Coren, Franco; VOLPI, Valentina; TINIVELLA, Umberta. Gas Hydrate physical properties imaging by multi-attribute analysis - Blake Ridge BSR case History. *Marine Geology, Trieste*, n. 178, p.197-210, 22 Mar. 2001.
- Collett, LAD, (2000) - Detection of Gas Hydrate with logs and Assessment of Gas Hydrate and gas on the Blake Ridge with Electrical Resistivity.
- Damuth, J. E. & Kumar, N. 1975, Amazon Cone Morphology, sediment age, and growth pattern. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 86 p. 863-878.
- Damuth, J. E., Kowsmann, R. O., Flood, R. D., Belderson, R. H., and Gorini, M. A., 1983. Age relationships of distributary channels on Amazon deep-sea fan: implications for fan growth pattern. *Geology*, 11: 470-473.
- Damuth, J. E., Kolla, V., Flood, R. D., Kowsmann, R. O., Monteiro, M. C., Gorini, M. A., Palma, J. J. C., and Belderson, R. H., 1983. Distributary channel meandering and bifurcation patterns on Amazon deep-sea fan as revealed by long-range side-scan sonar (GLORIA). *Geology*, 11:94-98.
- Damuth, J. E., Kowsmann, R. O., Flood, R. D., Belderson, R. H., and Gorini, M. A., 1983. Age relationships of distributary channels on Amazon deep-sea fan: implications for fan growth pattern. *Geology*, 11: 470-473.

- Damuth, J. E., Flood, R. D., Pirmez, C., & Manley, P. L., 1995, Architectural Elements and depositional processes of Amazon Deep-sea Fan imaged by long-range sidescan sonar (GLORIA), bathymetric swath-mapping (Sea Beam), high-resolution seismic and piston-core data, *in* Pickering, K.T., Hiscott, R.N., Kenyon, N.H., Ricci Lucchi, F., and Smith, R.D.A., eds., *Atlas of Deep Water Environments; Architectural Style in Turbidites*: Oxford, U.K., Chapman & Hall, p. 105–121.
- Damuth, J. E., The Amazon-HARP fan model: Facies distributions in mud-rich deep-sea fans based on systematic coring of architectural elements of Amazon Fan. In: CIESM, *Turbidite Systems and Deep-Sea Fans of the Mediterranean and Black Seas*, CIESM Workshop Series No. 17, Monaco, p. 1-3. 2002.
- Figueiredo, J. J. P., Zalán, P. V.; Soares, E. F. *Boletim Geociências Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 301, 2007.
- Figueiredo, J., Hoorn, C., Ven der Ven, P., Soares, E., 2009. Late miocene onset of the Amazon River and the Amazon deep-sea fan: Evidence from the Foz do Amazonas Basin. *Geology*. vol. 37 n. 7, 619-622.
- Fontana, R.L., 1989, Evidências Geofísicas da Presença de Hidratos de gás na Bacia de Pelotas – Brazil. *Primeiro Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro, vol. 1, p. 234 – 248.
- Fontana, R.L., & Mussumeci, A., 1994, Hydrates Offshore Brazil, In: *Inter. Conference on Natural Gas Hydrate - Annals of the New York Acad. of Sciences*, Vol. 175, p.106-113.
- Flood, R.D. & Damuth, J.E., 1987, Quantitative characteristics of sinuous distributary channels on the Amazon deep-sea fan. *Geol.Soc. Am. Bull.* 98, p. 728 – 738.
- Flood, R.D., Manley, P.L., Kowsmann, R.O., Appi, C.J. & Pirmez, C., 1991, Seismic facies and late Quaternary growth of Amazon submarine fan. In Weimer, P., and Link, M.H. (Eds.), *Seismic Facies and Sedimentary Processes of Modern and Ancient Submarine Fans*: New York (Springer), p. 415 – 433.
- Flood, R.D.; Piper, D.J.W. & Shipboard Scientific Party, 1995. In: Flood, R.D.; Piper, D.J.W.; Klaus, A., et al., 1995. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, vol. 155: College Station, TX (Ocean Drilling Program), p. 5-16.

- Flood, R.D.; Piper, D.J.W.; Klaus, A., and Peterson, L.C. (Eds.), 1997. Computed Tomography scan analysis of site 941 cores, western mass-transport deposit, Amazon Fan. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol.155, Cap.28., p. 465 – 475.
- Freire, A. F. M. (2012). Hidratos de Gás: Gênese, Prospecção, Recursos e Ambientes Geodinâmicos. Congresso Brasileiro de Geologia, 46, São Paulo, 2012. Fórum Especial F4. São Paulo, SBG. V. 1 (Simpósios), p. 565.
- Freitas, A M. V. *Estudo da formação de hidratos de gás*. Brasil: UFRJ, 1990. (Dissertação de Mestrado).
- Yilmaz, Ö., 1987, *Seismic data processing*: Soc. Expl. Geophysics.
- Grossmann, G. S. Processamento e Interpretação de Dados Sísmicos de Parasound no Delta Submarino do Amazonas. 2002. 100 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha) - Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2002.
- Machado, 2009 - Mestrado: A importância do hidrato de gás como fonte de energia alternativa e como possível agente das mudanças climáticas.
- Malinverno, A. The relationship between the depth of the sulfate methane transition and gás hydrate occurrence in the northern cascadia margin. in: proceedings of the 7th international conference on gas hydrates, 10964., 17/06/2011, Edinburgh, Scotland, United Kingdom. Conference. New York: Lamont-Doherty Earth Observatory Of Columbia University, 2011. p. 1 - 6.
- Maslin, M. A., Mikkelsen, N., Vilela, C. Haq, B., 1998. Sea-level and gas-hydrate controlled catastrophic sediment failures of the Amazon Fan. *Geology* 26, 1107-1110.
- Maslin, Mark et al. Gas hydrates: Past and Future Geohazard? Philosophical Transactions of The Royal Society, Bristol, p.2369-2393, 19 april. 2010.
- Matos, R.M.D. 1999. From oblique rifting to a transform margin: the opening of the Equatorial Atlantic. In: SBGf, International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 6, Rio de Janeiro, 1 CD ROM.
- Matos, R. M.D. 2000. Tectonic evolution of the equatorial South Atlantic. In: Mohriak, W.U., Talwani, M. Atlantic riftes and continental margins, AGU Geophysical Monograph 115: 331-354.

- Max, Michael D. (Ed.). Natural Gas Hydrate: In Oceanic and Permafrost Environments. Washington Dc: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- Melo, Felipe Ferreira de et al. Transporte de Massa e Hidratos de Gás no Leque Submarino do Amazonas. In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 11., 2009, Salvador. Transporte de Massa e Hidratos de Gás no Leque Submarino do Amazonas. Salvador: SBF, 2009. p. 1 - 5.
- Nissen, S. E. (2002). Seismic Attributes for the Explorationist. Kansas Geological Survey: Open-file Report, nº 49. 2002: North Midcontinent PTTC Petroleum Technology Fair.
- Nóbrega, M. Mapeamento de estruturas do embasamento e seus limites crustais no Atlântico equatorial, adjacente à margem brasileira. 2011. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha)-Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011.
- Normark, W.R., Damuth, J.E., and the Leg 155 Sedimentology Group, 1997, Sedimentary facies and associated depositional elements of the Amazon Fan: in: Flood, R.D., Piper, D.J.W., Klaus, A., and Peterson, L.C. (Eds), 1997, Proc. ODP, Sci. Results, 155: College Station, TX (Ocean Drilling Program), p. 611-651.
- Kvenvolden, K. A., 1993. Gas hydrates-geological perspective and global change: Rev. Geophys., v. 31, p. 173-187.
- Oliveira, L. G. S.; Neto, M. A. M.; Barbosa, M. S. C. Proposição de um modelo crustal para a região do Cone do Amazonas baseado em dados gravimétricos. Revista Brasileira de Geofísica, vol. 21, n.1 São Paulo, p. 1-2, 2003.
- Oliveira, V. A tectônica Gravitacional no Cone do Amazonas: Compartimentação Estrutural e Mecanismos Controladores. 2005. 83 f. Dissertação (Mestrado) - LAGEMAR, UFF, Rio de Janeiro, 2005.
- Pederneiras, R. L.; Ferreira, E.; Reis, A. T.; Silva, C. G., Gorini, C. III Congresso Brasileiro de Oceanografia CBO. 2008. I Congresso Ibero Americano de Oceanografia I CIAO Fortaleza (CE), 20 a 24 de maio de 2008. Instabilidades do fundo submarino induzidas por Tectônica Gravitacional, Leque Submarino do Amazonas, 2008.
- Pintas, E. M. Análise de Atributos AVO e Física de Rochas Aplicados na Identificação e Caracterização de Hidratos de Gás na Bacia de Pelotas. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Curso de Geofísica, LAGEMAR, UFF, Rio de Janeiro, 2011.

- Piper, D. J. W., Pirmez, C., Manley., P.L., Long, D., Flood, R.D., Normark, W.R., and Showers, W., 1997. Mass-transport deposits of the Amazon Fan. *In* Flood, R.D., Piper, D.J.W., Klaus, A., and Peterson, L.C. (Eds.), *Proc. ODP, Sci. Results*, 155: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 109–146.
- Proceedings of the Ocean Drilling Program, 1994, Barbados. Initial Reports of Amazon Fan. Barbados: National Science Foundation And Joint oceanographic Institutions, Inc., 1994. 21 p.
- Reis A. T., Silva C. G., Vendeville B. C., Gorini, C., Perovano, R., Araújo, E., Mattioda, J. 2008. Investigação da tectônica gravitacional na Bacia da Foz do Amazonas a partir de análise sísmica e de modelagem experimental. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geofísica*, 6: 16–19.
- Reis, T. R., Silva, C. G., Oliveira, V., Vendeville, B., Gorini, C., Loncke, L., Mourgues, R., Caldas, N., Mattioda, J. A tectônica gravitacional no cone submarino do Amazonas, Margem Equatorial Brasileira. *In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, 11, International Symposium on Tectonics, 5. *Boletim de Resumos Expandidos Natal: SBG*, 2007. p. 38 - 40.
- Rosa, M.L.C.C.; R.N., Ayup-zouain; E.G., Barboza. Utilização de Seções Sísmicas 2D na Identificação de Zonas de Escapes de Fluidos. *Gravel, Porto Alegre*, n. 4, p.109-118, 10 dez. 2006.
- Sad, A.R. E.; Silveira, D.P.; & Machado, M.A.P., 1997, Hidratos de gás marinhos: a mega ocorrência da bacia de Pelotas/Brasil. 5º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo, *Boletim de Resumos Expandidos*, v. 1, p. 71 – 74.
- Sad, A.R. E.; Silveira, D.P.; S.R.P; Silva, R.R. Maciel & Machado, M.A.P., 1998, Marine gas hydrates evidence along the Brazilian coast. *In: AAPG International Conference and Exhibition; Abstracts*. Rio de Janeiro, Brazil, p. 146 – 147.
- Soares Junior, A. V.; Costa, J. B. S.; Hasui, Y. Evolução da Margem Atlântica Equatorial do Brasil: três fases distensivas. *Geociências (São Paulo)*, v. 27, p. 427-437, 2008.

- Tan, Linyun; Johnson, Arthur H.; Cheng, Lijun. Thermogenic Gas Hydrate System and Models of Gas Hydrate Occurrence Patterns. In: AAPG International Conference and Exhibition, 80268., 2012, Singapore. Thermogenic Gas Hydrate System and Models of Gas Hydrate Occurrence Patterns. Chongqing, China: AAPG, 2012. p. 1 - 3.
- Taner, M. T., Sheriff, R. E. Application of amplitude, frequency, and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon determination: in Applications to hydrocarbon exploration, C. E. Payton, Ed., AAPG Memoir 26: Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, p. 30-327, 1977.
- Taner, M. T.; Koehler, F.; Sheriff, R. E. Complex Seismic Trace Analysis. Geophysics, Houston, v. 44, n. 6, p.1041-1043, 10 jun. 1979.
- Taner, M. T., Schuelke, J. S., O'doherty, R., Baysal, E. Seismic attributes revisited: 64th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists Expanded Abstracts, 1104 - 1106, 1994.
- Taner, M. T. Seismic attributes. CSEG. Vol 26 (9), p. 48 - 56, 2001.
- Tanaka, M. D. Reconhecimento das Ocorrências de Hidratos de Gás no Cone do Amazonas. 2003. 78 f. Dissertação (Mestrado) - LAGEMAR, UFF, Rio de Janeiro, 2003.
- Thakur, N. K.; Rajput, S. Exploration of Gás Hydrates: Geophysical Techniques. New York: Springer, 2011, 293 p.
- Tomasini J, De Santa Ana H, Conti B, Ferro S, Gristo P, Marmisolle J, Morales E, Rodríguez P, Soto M., Veroslavsky G. Assessment of marine gas Hydrates and associated free gas distribution offshore Uruguay. Journal of Geological Research, vol. 2011, ID 326250, p. 7, 2011.
- Torres, L. C., Jeck, I. K., & Tavares, A. A. L. A. (2010). Configuração Morfológica do Cone do Amazonas a Partir da Integração de Dados Batimétricos. Revista Brasileira de Geomorfologia, 4 (1).