



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

**RAISSA HELENA SIMÕES CAMPOS**

**OCORRÊNCIAS DE GÁS NOS SEDIMENTOS  
HOLOCÊNICOS DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS:  
ORIGEM E DISTRIBUIÇÃO**

Salvador  
2010

**RAISSA HELENA SIMÕES CAMPOS**

**OCORRÊNCIAS DE GÁS NOS SEDIMENTOS  
HOLOCÊNICOS DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS: ORIGEM  
E DISTRIBUIÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: José Maria Landim Dominguez

Salvador  
2010

## TERMO DE APROVAÇÃO

RAISSA HELENA SIMÕES CAMPOS

### OCORRÊNCIAS DE GÁS NOS SEDIMENTOS HOLOCÊNICOS DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS: ORIGEM E DISTRIBUIÇÃO

Trabalho Final de Graduação aprovado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora:

---

José Maria Landim Dominguez - Orientador  
Doutor em Geologia e Geofísica Marinha pela University of Miami  
Universidade Federal da Bahia

---

Antônio Expedito Gomes de Azevedo  
Doutor em Ciências da Terra pela Columbia University  
Universidade Federal da Bahia

---

Luiz Antônio Pereira de Souza  
Doutor em Oceanografia Química e Geológica pela Universidade de São Paulo  
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Salvador, 09 de dezembro de 2010

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus amados pais, JACQUELINE e JUAREZ, e ao meu avô REININE, pelo apoio e amor a mim dedicados ao longo de toda a minha vida, e por serem os grandes responsáveis por tornar realidade meu desejo de cursar Oceanografia.

Ao meu orientador, LANDIM, pelas grandes oportunidades e aprendizados, por acreditar em mim às vezes mais do que eu mesma, e sempre me incentivar a buscar o meu melhor.

Ao meu amor, VICTOR, por existir em minha vida e ser meu porto-seguro.

A REBECA, por ser uma irmã muito melhor do que eu jamais mereci.

A VINÍCIUS, pela amizade sem tamanho.

Aos meus grandes amigos LARA e RAFAEL, com quem eu contei sempre que precisei, e que foram responsáveis pelos meus melhores momentos desse quatro anos em Salvador.

Aos amigos CAMILLA, HIURE, YURI, NANDO, NICÁCIO, DIEGO, IGOR, ANINHA; aos meus sogros MARINA e HERMÍNIO, às minhas tias JANETE SIMÕES, JANETE GONÇALVES, JOYLE, MARIA GERALDA e REINICE, e a todos os meus familiares que me apoiaram durante minha trajetória.

Aos professores LANDIM, CLEMENTE TANAJURA, VANESSA HATJE e FRANCISCO BARROS, por me mostrarem o melhor da Oceanografia.

Ao professor RONALDO MONTENEGRO pela primeira oportunidade de atuação como oceanógrafa.

Aos meus colegas do Laboratório de Estudos Costeiros.

A CAMILLA CARICCHIO, pelas fotos sub-aquáticas e auxílio em trabalho de campo.

Ao CNPq pelas bolsas de Iniciação Científica, concedidas ao longo do curso.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho

Às minhas avós (*in  
memorian*), Lourdes e  
Helena, tudo aquilo que eu  
puder dedicar.

## RESUMO

A presença de metano e outros gases rasos no sedimento de fundo marinho é comum e característico de ambientes rasos que recebem grandes aportes de matéria orgânica. Diversas anomalias acústicas indicativas da presença de gás raso em sedimento de fundo foram encontradas durante levantamentos sísmicos de alta resolução, efetuados na Baía de Todos os Santos (BTS). O presente trabalho teve por objetivo identificar e mapear a distribuição espacial dos depósitos de gás nos sedimentos holocênicos que preenchem a BTS e caracterizar essas acumulações e seus locais de ocorrência, determinando, por fim, a origem desse gás. Para isso, diversos perfis sísmicos levantados na BTS foram interpretados, e amostras de sedimentos superficiais e testemunhos foram coletados, para posterior realização de análises sedimentológicas e geoquímicas. Os dados obtidos permitiram a confecção de diversos mapas temáticos mostrando a distribuição dos principais parâmetros analisados. Foi encontrada uma área total de acumulações de gás de 161Km<sup>2</sup>. Essa área corresponde a 15% da área total da BTS, ou 27% dos 600km<sup>2</sup> imageados. Objetivando uma melhor caracterização das acumulações e das regiões de ocorrência de gás, a área imageada da BTS foi dividida em seis zonas; três de ocorrências de gás livre no sedimento (ANW, ANE e AL), e três sem evidências de ocorrências de gás livre (FSG, ER e GAI). Os locais de acumulação de gás mostram-se em íntima associação com a distribuição espacial de sedimentos lamosos ricos em matéria orgânica. As ocorrências na região noroeste da BTS (ANW) são bastante rasas, cerca de 90% das anomalias acústicas são identificadas a menos de 3m abaixo da interface sedimento-água. Testemunhos coletados nessa região indicaram teores anômalos de metano (> 90 ppm), da ordem de até 10<sup>4</sup> ppm entre 1,3 e 2,4m abaixo do fundo marinho. A determinação da razão isotópica <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C indicou uma origem biogênica para esse gás.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Colocação do problema .....	1
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
2.1	Objetivo Geral.....	4
2.2	Objetivos Específicos .....	4
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>5</b>
3.1	Condições climatológicas .....	6
3.2	Características Hidrodinâmicas .....	7
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>9</b>
4.1	Levantamento e processamento dos dados sísmicos .....	9
4.2	Coleta de sedimentos superficiais, análises texturais e geoquímicas .....	11
4.3	Coleta de testemunhos e gás .....	12
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>15</b>
5.1	Dados Sísmicos.....	15
5.1.1	Tipos de Acumulações de Gás.....	16
5.1.2	Distribuição Espacial das Acumulações de Gás na BTS.....	19
5.1.3	Espessura dos depósitos sedimentares holocênicos .....	20
5.2	Aspectos Sedimentológicos e Geoquímicos .....	22
5.2.1	Textura dos Sedimentos Superficiais .....	23
5.2.2	Teor de Carbono Orgânico Total (COT) .....	25
5.2.3	Teor de Carbonato .....	26
5.3	Zonas de Ocorrência e Não-Ocorrência de Gás na BTS.....	27
5.3.1	Zona de Acumulação de Gás Noroeste (ANW) .....	27
5.3.2	Zona de Acumulação de Gás Nordeste (ANE).....	30
5.3.3	Zonas de Acumulação de Gás Localizadas (AL) .....	31
5.3.4	Zonas de Sedimentos Finos Sem Gás (FSG).....	32
5.3.5	Zona de Embasamento Acústico Raso (ER) .....	32
5.3.6	Zonas de Sedimentos Grossos Acusticamente Impenetráveis (GAI).....	33
5.4	Composição dos hidrocarbonetos no gás.....	34
5.5	Isótopos de carbono do gás Metano.....	35
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>36</b>
6.1	Concentrações de metano livre em sedimentos transicionais/ marinhos .....	36
6.2	Origem do gás na BTS .....	38
6.3	Mecanismos de formação do metano biogênico.....	39
6.4	Zonas de acumulação de gás da BTS.....	42
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>49</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudos. ....	6
Figura 2 – Campo de correntes de maré vazante da BTS (extraído de Lessa et al, 2009) .....	8
Figura 3 – (A) Perfilador de Sub-fundo Edge-Tech, modelo SB-216S; (B) amostragem de sedimentos superficiais utilizando draga do tipo Van Veen.....	9
Figura 4 – Mapas mostrando as linhas levantadas com o perfilador de sub-fundo, com destaque para aquelas que se encontram exemplificadas neste trabalho.....	10
Figura 5 - Distribuição das amostras superficiais coletadas no âmbito deste trabalho, estações de coleta dos testemunhos e malha de dados cedidos pelo BAMPETRO.....	11
Figura 6 – Processo de coleta de testemunho, através de mergulho autônomo (A, B e C), de amostragem de sedimento de sub-superfície (D e E) e armazenamento dessas amostras em recipientes do tipo Isojar® (F).....	13
Figura 7 – Trecho do Perfil 5c (A) não interpretado, (B) interpretado e (C) legenda.....	16
Figura 8 – Acumulação de gás do tipo Cobertor Acústico - Perfil 3m (A) não interpretado e (B) interpretado.....	17
Figura 9 – Acumulações de gás do tipo Cortina Acústica - Perfil 11 (A) não interpretado e (B) interpretado.....	18
Figura 10 – Acumulações e gás dos tipos Turbidez Acústica e Colunas Acústicas - Perfil 49(2) (A) não interpretado e (B) interpretado. ....	19
Figura 11 – Distribuição das anomalias acústicas indicativas da presença de gás livre (pontos vermelhos), nos registros sísmicos. ....	20
Figura 12 – Espessura dos pacotes sedimentares acusticamente transparentes da BTS. ....	21
Figura 13 – Distribuição espacial dos teores de (A) cascalho; (B) areia; (C) silte e (D) argila nos sedimentos superficiais de fundo. ....	24
Figura 14 – Teores de carbono orgânico total no sedimento superficial de fundo da BTS.....	25
Figura 15 – Teores de carbonato no sedimento superficial de fundo da BTS.....	26
Figura 16 – Distribuição das diferentes zonas da BTS: Acumulação de Gás da Porção Noroeste, (ANW); Acumulação de Gás da Porção Nordeste (ANE); Acumulações Localizadas de Gás (AL); Embasamento Raso (ER); Sedimentos Finos Sem Gás (FSG); e Sedimentos Grossos Acusticamente Impenetrável (GAI). ....	28
Figura 17 - Distribuição de frequências em função da profundidade das acumulações de gás abaixo da interface ar-água nas zonas ANW, ANE e AL. ....	29
Figura 18 - Zona ANW - Perfil 3d (A) não interpretado e (B) interpretado. ....	30
Figura 19 - Zona ANE - Perfil 1z (A) não interpretado e (B) interpretado.....	31
Figura 20 - Zona ER e AL - Perfil 7c (2) (A) não interpretado e (B) interpretado. ....	32
Figura 21 – Zonas FSG e ER - Perfil 7c (1) (A) não interpretado e (B) interpretado. ....	33
Figura 22 - Zona GAI - Perfil 10a (A) não interpretado e (B) interpretado.....	34
Figura 23 – Frequência de medidas de valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ biogênico para sedimentos (extraída de Blair, 1998).....	39
Figura 24 – Seção mostrando o ecossistema microbiano em diferentes camadas do sedimento (adaptado de Rice e Claypool, 1981).....	41
Figura 25 - Mapa da distribuição de sedimentos finos na Baía de Todos os Santos, sobreposto às zonas de ocorrência de gás. ....	44



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Teores de Carbonato, Carbono Orgânico Total (COT), Matéria Orgânica (MO), Cascalho, Areia, Silte e Argila encontrados nas 25 amostras superficiais de sedimento, coletadas em locais com presença (CG) e ausência (SG) de acumulações de gás em sub-superfície. ....	22
Tabela 2 - P1 – Profundidade da coluna d’água no momento da coleta; P2 – Profundidade da coleta de sedimento abaixo do fundo marinho; C1 – Metano; C2 – Etano; C3H4 – Eteno; C3 – Propano; C3H6 – Propeno; IC4 – Iso-Butano; NC4 – <i>n</i> -Butano; C4H8 – 1-Buteno; IC5 – Iso-Pentano; NC5 – <i>n</i> -Pentano; C5+ - Hexano+; $C_1/(C_2+C_3)$ – Parâmetro de Bernard. Concentrações em ppmv. * 1ª coleta (16/09/2010), ** 2ª coleta (29/09/2010). Amarelo – concentrações anômalas. ....	35
Tabela 3 – Média dos teores de carbono orgânico total, carbonato, cascalho, areia, silte e lama para os locais com e sem a presença de gás. ....	43

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Colocação do problema

A presença de gás raso no sedimento de fundo marinho é comum em ambientes rasos e produtivos que recebem grandes aportes de matéria orgânica reativa (Mazumdar et al., 2009), e tem sido reconhecida como uma característica desses locais há um longo tempo (Garcia-Gil et al., 2002). Desde os primeiros relatos, diferentes autores têm reportado ocorrências de metano e outros gases em sedimentos marinhos e em áreas costeiras, como baías e estuários (Baraza e Ercilla, 1996; Hampton et al., 2002; Emeis et al, 2004; Frazão e Vital, 2007).

As acumulações de gás raso, ou seja, encontradas no primeiro quilômetro do sedimento, podem ter origem biogênica ou termogênica (Judd et al, 1997). O gás de origem biogênica é formado por metanogênese microbiana em ambientes anaeróbicos, como abaixo da zona de sulfato-redução em sedimentos, e na zona de turdidez máxima em estuários (Kitidis et al., 2007). O gás biogênico apresenta-se isotopicamente depletado em  $^{13}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C} < -60\text{‰}$ ), e possui altíssimos teores de metano (Santos Neto, 2004). Por outro lado, o gás de origem termogênica é formado em grandes profundidades, em locais de elevada temperatura e pressão, podendo migrar para a superfície e ficar retido em sedimentos finos. Esse apresenta menores teores de metano se comparado aos gases puramente biogênicos ( $\text{CH}_4 < 95\%$ ) e  $-40\text{‰} > \delta^{13}\text{C} > -50\text{‰}$  (Santos Neto, 2004). Em ambos os casos o gás é derivado da matéria orgânica, que deve ser abundante no local para a formação (Judd, 2004) e se apresenta rico em metano (Lin, et al., 2010).

O metano pode existir em vários estados: como gás livre nos poros, como gás dissolvido em solução ou, em circunstâncias especiais, como hidratos de gás (Mazumdar et al., 2009; Diez et al., 2007). O termo “gás livre” denota o gás no sedimento que não está em solução e ocorre quando o limite de solubilidade é excedido, formando bolhas (Abegg & Anderson, 1997). A solubilidade do metano em águas depende da temperatura da água no fundo, da pressão hidrostática e salinidade (Yamamoto et al., 1976). Quando presente na forma de bolhas de gás, mesmo em baixas concentrações (~0,01% de conteúdo de gás livre), o metano pode reduzir drasticamente a velocidade de ondas compressionais e

umentar a atenuação das ondas e a dissipação do som (Anderson and Hampton, 1980). Portanto, sedimentos contendo gás livre atenuam a energia da onda, causando o bloqueio da penetração do sinal, o que pode resultar em um mascaramento bastante característico das propriedades deposicionais dos sedimentos subjacentes em dados sísmicos (Wilkins e Richardson, 1998).

O estudo de ocorrências de gás em sedimento se faz importante pois, em alguns casos, a presença de hidrocarbonetos gasosos rasos é sinal da existência de acumulações mais profundas e extensas em bacias fronteiriças (Okyar and Ediger, 1999). Os sedimentos em que estão presentes quantidades suficientes de matéria orgânica para a geração de metano apresentam sobretudo granulometria fina, sendo portanto impermeáveis (Judd, 2004). Conseqüentemente, a migração do gás ou da água intersticial rica em metano tende a ocorrer por caminhos permeáveis de migração (Yun et al., 1999).

Importante também é o fato de que a presença de fluidos intersticiais com pressões muito altas no sedimento pode causar uma redução da resistência ao cisalhamento e levar à instabilidade do sedimento (Prior and Coleman, 1984). A presença de hidrocarbonetos gasosos pode representar um perigo, pois, em circunstâncias em que o gás se acumula sob camadas impermeáveis, a pressão pode causar explosões durante perfurações (Okyar and Ediger, 1999). Similarmente, um aumento na pressão intersticial resultante da acumulação de gás diminui a resistência do sedimento ao cisalhamento, o que pode causar o colapso de estruturas submarinas (Davis, 1992).

Apesar de as rochas e os sedimentos que selam as reservas de óleo e gás serem considerados impermeáveis, muitos permitem o escape de gás durante certos períodos para níveis mais altos no sedimento, ou mesmo para a interface sedimento-água e, conseqüentemente, para a atmosfera (Judd, 2004).

Adicionalmente, o metano é um dos mais importantes gases-estufa biogênicos (Iglesias e García-Gil, 2007) e a preocupação mundial com o aquecimento do planeta, devido ao Efeito Estufa, tem despertado a atenção para escapes de gás de sedimentos marinhos, os quais podem estar contribuindo de forma significativa, embora ainda não bem entendida, para as concentrações atmosféricas de metano e CO<sub>2</sub> (Garcia-Gil et al., 2002). Apesar de as terras úmidas serem consideradas como a maior fonte global de metano para a atmosfera, emissões provenientes dos oceanos estão recebendo uma crescente atenção, especialmente emissões costeiras, que, se imagina, contribuem com 75% das emissões

totais dos oceanos (Judd et al., 2002; Dimitrov, 2002). De fato, a compilação de distribuição global de gases rasos, realizada por Fleischer et al. (2001), mostra que a maior parte das ocorrências de gás se dá em profundidades menores que 50m, como é o caso da Baía de Todos os Santos (BTS), localizada na região do Recôncavo do Estado da Bahia.

Diversas feições indicando a presença de gás raso no sedimento de fundo foram encontradas durante levantamentos sísmicos de alta resolução efetuados na Baía de Todos os Santos, como indicado em Dominguez & Bittencourt (2009), ao passo que não existem estudos prévios na literatura sobre essas ocorrências para a região.

## **2 OBJETIVOS**

### ***2.1 Objetivo Geral***

Identificar e mapear a distribuição espacial dos depósitos de gás nos sedimentos holocênicos que preenchem a Baía de Todos os Santos, assim como estabelecer sua origem.

### ***2.2 Objetivos Específicos***

Determinar os arranjos estratigráficos, sedimentológicos e geoquímicos que mais favorecem a presença de gás;

Determinar a composição desse gás, relacionando-a à sua origem e aos possíveis mecanismos geradores na área de estudo;

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Baía de Todos os Santos (BTS) (Figura 1) é um corpo de água costeiro localizado sobre as rochas sedimentares que compõem a Bacia Sedimentar do Recôncavo, sendo delimitada pelas falhas de Maragogipe e Salvador (Dominguez e Bittencourt, 2009).

A BTS é a segunda maior baía do Brasil, abrangendo uma área máxima em preamar de sizígia de 1223 km<sup>2</sup>, em que cerca de 94% apresentam profundidades inferiores a 25m. A zona intermareal representa 327 km<sup>2</sup>, sendo 152 km<sup>2</sup> ocupados por manguezais (Cirano & Lessa, 2007). A baía comporta internamente três outras baías: as baías do Iguape, de Aratu e de Itapagipe (CRA, 2005). Possui ainda quase uma centena de ilhas e a maior delas, Itaparica, separa as duas conexões existentes entre a BTS e o mar aberto: o Canal de Salvador, mais importante e responsável pela maior parte das trocas de água com o oceano, possui profundidades média e máxima de 25m e 102m, respectivamente; e o Canal de Itaparica, mais estreito, com profundidade média de cerca de 10m (Lessa et al., 2000). As áreas mais profundas no interior da baía (70 m) estão relacionadas ao paleocanal do rio Paraguaçu (Cirano & Lessa, 2007); ao estreito a norte da Ilha dos Frades (60 m); e às passagens para a Baía de Aratu (30 m) e Baía de Iguape (50 m) (Lessa et al., 2000).

A BTS recebe a descarga de três grandes bacias de drenagem, associadas aos rios Paraguaçu, Jaguaripe e Subaé, além de dezenas de pequenas bacias que geram um efeito de descarga difusa durante os meses úmidos (Lessa et al., 2009). As variações de temperatura e salinidade na BTS são claramente marinhas (24°C - 30°C e 36,7 - 33,0, respectivamente), possuindo uma coluna d'água bem misturada. Condições estuarinas são encontradas apenas ao longo dos canais dos rios Paraguaçu e Subaé (Wolgemuth et al.1981). Isso decorre do fato de que o fluxo médio de água doce para o interior da baía, mesmo antes da construção da barragem Pedra do Cavalo no Rio Paraguaçu, já era cerca de 200 vezes menor que a descarga total média de maré na boca da baía. (Lessa et al, 2001).

Os sedimentos de fundo existentes na Baía de Todos os Santos apresentam duas origens: (i) siliciclásticos ou terrígenos, oriundos da desagregação de rochas e das descargas fluviais dos rios que nela deságuam, além daqueles que adentram a

desembocadura da baía, trazidos pelas correntes de maré e (ii) biogênicos, resultado da acumulação das partes duras de organismos marinhos (Lessa et al. 2000).

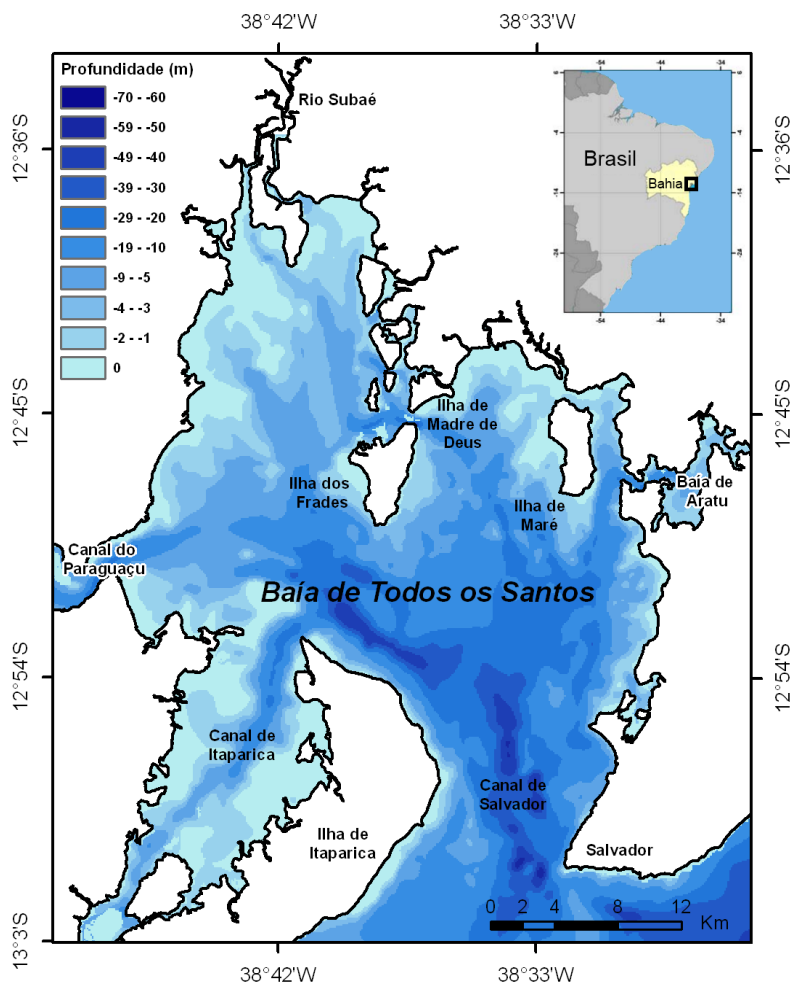


Figura 1 – Localização da área de estudos.

### 3.1 Condições climatológicas

Dentre os principais fenômenos climáticos que afetam a BTS estão: a pluviosidade, que interfere diretamente no maior ou menor aporte de água doce e transporte de materiais em suspensão; o vento, interferindo no comportamento hidrodinâmico da massa de água; e a temperatura do ar, afetando a relação de produção e consumo de nutrientes (CRA, 2005).

A circulação atmosférica na BTS obedece ao padrão do Nordeste brasileiro, que sofre a interferência predominante dos alísios provenientes do anticiclone semifixo do

Atlântico Sul, proporcionando condições de tempo bom durante quase todo o ano. Estes ventos provêm dos quadrantes NE, E e SE (CRA, 2000). Atuam ainda, a convergência intertropical (correntes de Norte), a massa equatorial continental (correntes de Oeste), que, no entanto, atinge a área de forma enfraquecida, e as frentes polares (correntes de Sul), responsáveis pela chegada das frentes frias e mudanças significativas nas condições do tempo (CRA, 2005).

A pressão atmosférica na área de estudo apresenta variações notadamente em função de variações climáticas sazonais, com claro aumento nos meses de outono/inverno. A pressão atmosférica, em condições meteorológicas calmas, atinge seu valor médio mínimo em março, quando não ultrapassa 1005,8 mb. A partir daí se eleva gradativamente até julho, quando atinge seu valor médio máximo de 1011,5 mb (CRA, 2000).

A precipitação média anual encontra-se próxima de 2.142 mm/ano, variando de 95,5mm em janeiro a 350mm em maio. (CRA, 2000). O clima ao redor da baía é tropical úmido, com temperatura média de 25,3°C.

### **3.2 Características Hidrodinâmicas**

A Baía de Todos os Santos é um sistema bem misturado, cuja circulação é fundamentalmente controlada pela maré. Observam-se ainda efeitos de controle batimétrico, fluxos de água doce limitados e efeitos de ventos próximos à superfície, limitados a condições específicas.

As marés no interior da baía são semi-diurnas, com pequenas, porém perceptíveis, desigualdades diurnas. Medições de elevação da superfície d'água indicam amplificação e defasagem distintas, à medida que a onda de maré se propaga para o interior da baía (Figura 2). As correntes mais fortes registradas ocorrem próximo à superfície, na entrada da baía. As velocidades máximas de corrente nessa região alcançam mais de 100 cm/s, com correntes médias na ordem de 40 cm/s. Essas correntes são bidirecionais, orientadas no sentido Norte-Sul e são geradas fundamentalmente pelas marés. Correntes de ordem de grandeza semelhante, apesar de ligeiramente menores, ocorrem no Canal de Itaparica, também orientadas no sentido Norte-Sul. Outras áreas da baía, onde se verificam correntes moderadamente altas incluem o canal ao norte da Ilha do Frade, a região central entre



Itaparica e a Ilha do Frade, e a região mais ao norte do Canal de Itaparica. Correntes mínimas globais são verificadas a aproximadamente 6 km ao sul da Ilha de Maré, com correntes máximas da ordem de 28 cm/s e uma velocidade média de cerca de 10 cm/s (CRA, 2000; Lessa et al, 2001, Lessa et al, 2009).

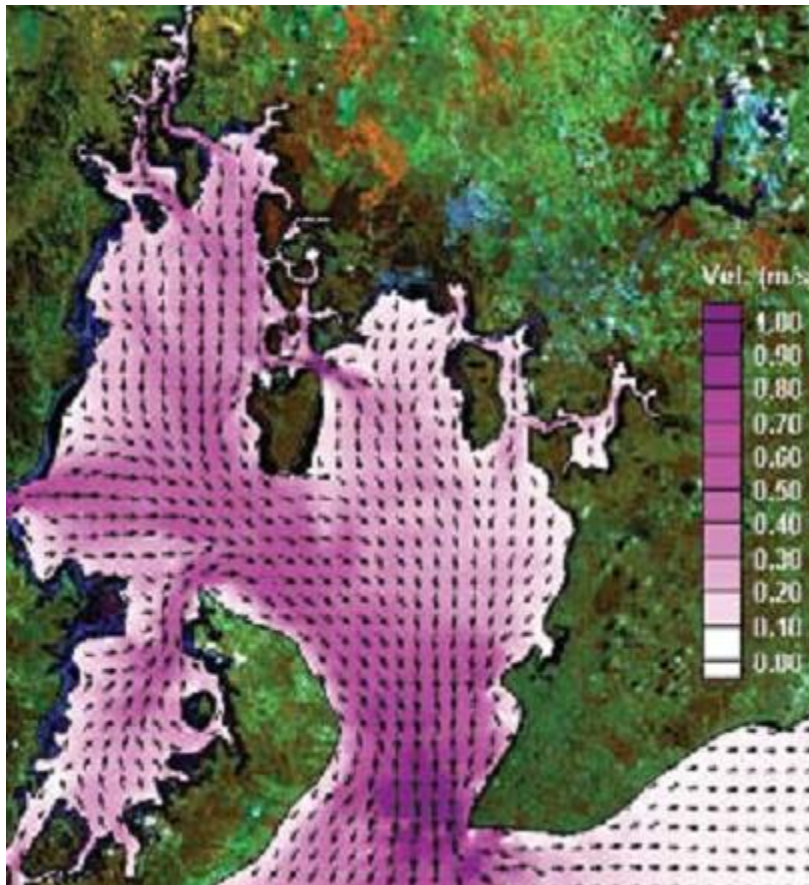
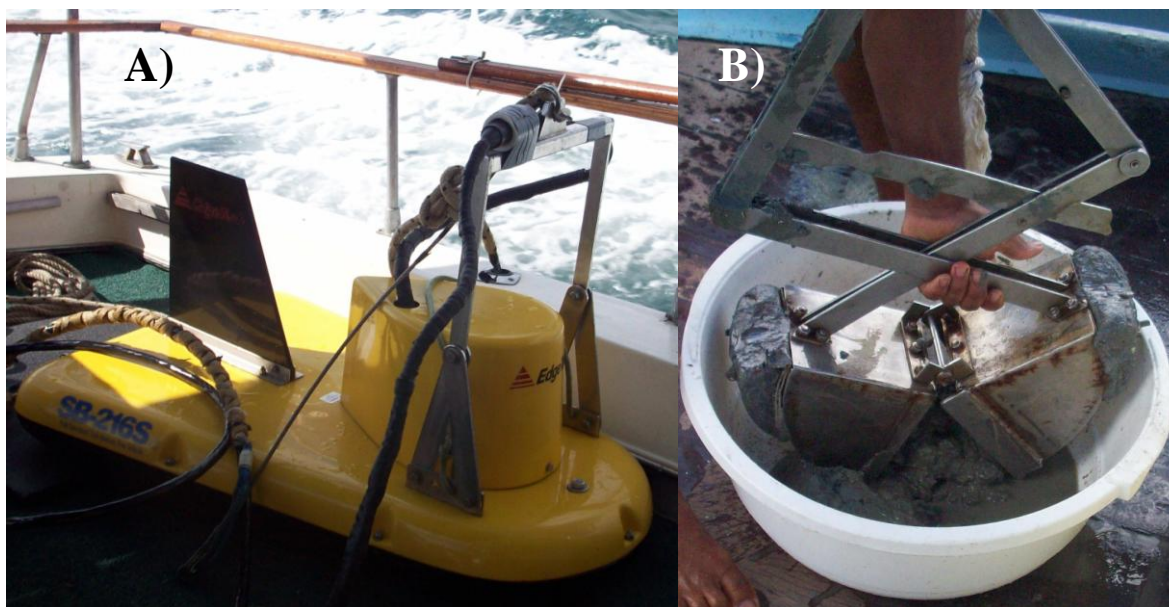


Figura 2 – Campo de correntes de maré vazante da BTS (extraído de Lessa et al, 2009)

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Levantamento e processamento dos dados sísmicos

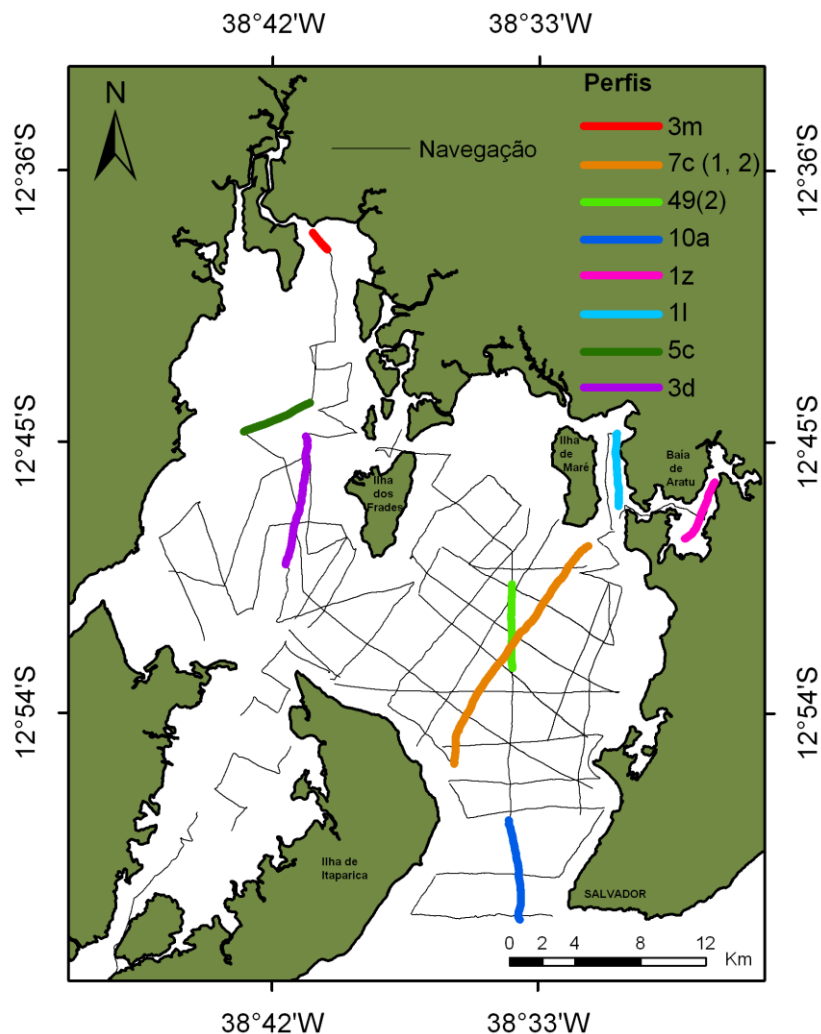
Um total de 700 km de registros sísmicos de alta resolução foram obtidos na região da Baía de Todos os Santos no âmbito do projeto TRANFER (Edital Universal do CNPq, ano 2007), em duas campanhas nos períodos de abril e maio de 2008 e de dezembro de 2008 a janeiro de 2009 (Figura 4). Esses levantamentos foram realizados utilizando-se um perfilador de subfundo, da Edgetech, modelo SB-216S, operando nas frequências de 2 a 16kHz (Figura 3).



**Figura 3 – (A) Perfilador de Sub-fundo Edge-Tech, modelo SB-216S; (B) amostragem de sedimentos superficiais utilizando draga do tipo Van Veen.**

O processamento dos dados sísmicos foi realizado utilizando-se dois softwares: o Discover Sub-bottom® (EdgeTech), no qual foram extraídos os valores dos coeficientes de reflexão; e o aplicativo SonarWiz.MAP® (Chesapeake Technology Inc.), para determinação da espessura sedimentar mínima e dos limites superiores das ocorrências de gás na área de estudo. Para isso foram digitalizadas as seguintes superfícies: o fundo marinho; o

embasamento acústico, isto é, o refletor mais profundo; e a superfície de mascaramento acústico, ou seja a superfície abaixo da qual as feições estratigráficas são mascaradas pela presença de gás. Os dados obtidos nas interpretações dos perfis foram exportados para o software Arcview 9.2®, e interpolados pelo método Inverso do Quadrado da Distância (Inverse Distance Weighted – IDW) para a criação de mapas da espessura das camadas dos sedimentos e dos locais e profundidades de ocorrência do gás.



**Figura 4 – Mapas mostrando as linhas levantadas com o perfilador de sub-fundo, com destaque para aquelas que se encontram exemplificadas neste trabalho.**

Os dados batimétricos foram extraídos das cartas batimétricas da DHN (disponíveis em várias escalas para diferentes segmentos da Baía de Todos os Santos), e por conta

disso, há algumas divergências entre as profundidades máximas encontradas nos perfis e aquelas mostradas no mapa de localização da área de estudos (Figura 1).

#### 4.2 Coleta de sedimentos superficiais, análises texturais e geoquímicas

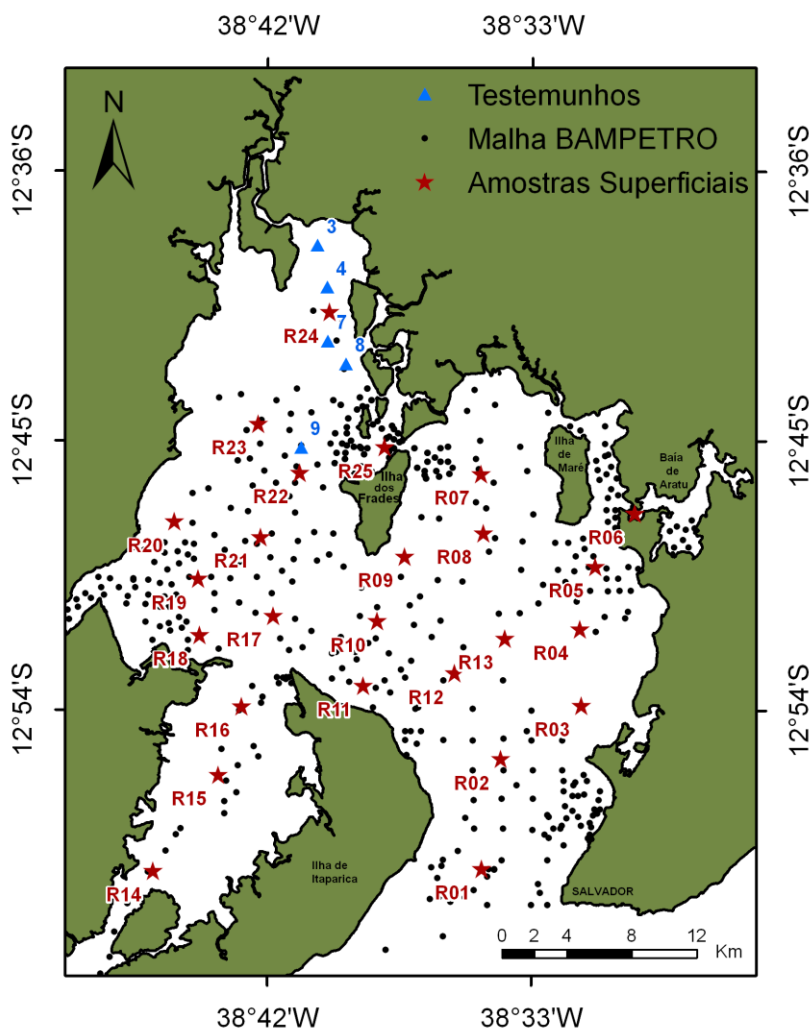


Figura 5 - Distribuição das amostras superficiais coletadas no âmbito deste trabalho, estações de coleta dos testemunhos e malha de dados cedidos pelo BAMPETRO.

A partir da análise dos dados sísmicos, em conjunto com os mapas de distribuição e profundidade de ocorrência do gás, foi planejada uma malha amostral para coleta de 25 amostras superficiais de sedimento (Figura 5), utilizando-se um busca fundo do tipo Van-

Veen (Figura 3 (B)). Os pontos de coleta foram posicionados coincidentes com as linhas sísmicas e distribuídos em regiões com presença e ausência de ocorrências de gás.

As amostras foram armazenadas em recipientes de alumínio, e refrigeradas para posterior liofilização e realização de análises laboratoriais. Foram realizadas análises de teores de Carbono Orgânico Total e Matéria Orgânica e conteúdo de Carbonato pelo Laboratório de Estudos do Petróleo (LEPETRO) do Núcleo de Estudos Ambientais da Universidade Federal da Bahia, seguindo a metodologia da Embrapa (1997). Ainda a partir dessas amostras, foi determinada a textura dos sedimentos por meio de análise granulométrica utilizando um Analisador de Partículas a Laser HORIBA®, modelo LA-950. Os parâmetros estatísticos (tamanho médio, desvio-padrão, teores de cascalho, areia e lama) foram determinados utilizando a planilha GRADISTAT V 4.0® (Blott & Pye, 2001). Os dados texturais destas amostras foram integrados a outros dados texturais de sedimentos disponibilizados pelo BAMPETRO (Banco de Dados Ambientais para a Indústria do Petróleo). Todos os resultados obtidos foram exportados para o aplicativo ArcView 9.2® (ESRI), e interpolados pelo método Inverso do Quadrado da Distância (Inverse Distance Weighted – IDW), para a confecção de diversos mapas da distribuição espacial dos parâmetros analisados.

### ***4.3 Coleta de testemunhos e gás***

A coleta de testemunhos para realização de análise de composição do gás e isótopos de carbono foi planejada a partir da análise dos perfis sísmicos. Os locais ideais de coleta deveriam ser rasos e, concomitantemente, apresentar ocorrências de gás bastante próximas ao fundo marinho. Ambientes como esse estão presentes na região noroeste da BTS, onde oito testemunhos, com comprimentos variando entre 1 e 3m e com 7cm de diâmetro, foram coletados através de mergulho autônomo em cinco estações.

Foram realizadas duas campanhas. Na primeira, no dia 16/09/2010, foram coletados quatro testemunhos, nos pontos 3, 4, 7 e 9, sendo que esses tinham cerca de 1,5m de comprimento. No dia 29/09/2010, quatro testemunhos foram coletados, nas estações 7, 9 e 8 (sendo que, nessa última, foram coletados dois testemunhos). Estes

testemunhos apresentaram 3m de comprimento, exceto a réplica do ponto 8, com comprimento de cerca de 1m.



**Figura 6 – Processo de coleta de testemunho, através de mergulho autônomo (A, B e C), de amostragem de sedimento de sub-superfície (D e E) e armazenamento dessas amostras em recipientes do tipo Isojar® (F).**

Os testemunhos foram introduzidos no sedimento com o auxílio de uma marreta e recuperados utilizando-se um cabo, que permitia içá-lo diretamente da embarcação. Tampas foram encaixadas nas extremidades do tubo no início e após a retirada total do testemunho do sedimento, com o intuito de impedir perdas. Após a chegada dos testemunhos à embarcação, esses foram imediatamente serrados a cerca de 20 cm da base, e uma amostra de aproximadamente 5 cm de comprimento foi extraída de cada um. Essas

amostras foram transferidas para recipientes do tipo Isojar® (~650ml), próprios para estocagem e posterior análise de sedimentos contendo gás. Antes da vedação, foram adicionadas dez gotas do bactericida *Zephiran Chloride* e água, até o recipiente encontrar-se com cerca de  $\frac{3}{4}$  de seu volume preenchido. O espaço restante, o *headspace*, é deixado livre para que, após os processos de separação, o gás liberado do sedimento atinja o equilíbrio e os teores de gás livre possam ser analisados (Figura 6).

Os Isojars® foram vedados com fita isolante e enviados para o laboratório da Integrated Petroleum Expertise Company (IPEX), onde foram analisados os teores de hidrocarbonetos (C1 – C6+). Nas amostras que apresentaram um teor mínimo de metano de 500ppm, foi determinada a razão isotópica  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ .

## 5 RESULTADOS

### 5.1 *Dados Sísmicos*

A interpretação dos registros sísmicos rasos de alta resolução possibilitou a identificação e o mapeamento das zonas de mascaramento acústico na Baía de Todos os Santos, permitindo a identificação de ocorrências de gás nesse sedimento. Além disso, foi possível a identificação de diferentes tipos de acumulações de gás e a confecção de um mapa de isópacas dos sedimentos holocênicos que preenchem parcialmente a BTS.

O mapeamento das zonas de mascaramento acústico como indicativas da presença de gás se baseia no fato de que, mesmo em pequenas concentrações, bolhas de gás existentes nos interstícios do sedimento ou na coluna d'água dissipam a energia acústica e aumentam as reflexões sísmicas, causando uma marcada resposta nos perfis sísmicos rasos. Nesses locais, a identificação de refletores subjacentes é, na maior parte dos casos, impedida. As acumulações de gás, entretanto, são freqüentemente descontínuas devido à existência de janelas entre ocorrências individuais, permitindo que os refletores acústicos relacionados ao acamamento das acumulações sedimentares sejam traçados. Este aspecto encontra-se bem exemplificado na figura 7 (A), que mostra um perfil sísmico contendo diversas feições encontradas na BTS (perfil 5c). É possível visualizar três zonas de ocorrência de gás bem marcadas. Entre estas acumulações de gás é possível visualizar claramente pacotes sedimentares holocênicos repousando sobre o embasamento acústico (figura 7 (B)).

Em todas as ilustrações das interpretações de perfis incluídas neste trabalho, a coluna d'água encontra-se representada em azul e as acumulações sedimentares holocênicas em marrom, repousando sobre o substrato acústico em branco. As linhas em verde representam as zonas de forte reflexão, e são consideradas como os limites superiores das ocorrências de gás livre. Essas frentes de gás demarcam a profundidade a partir da qual ocorre o mascaramento dos refletores subjacentes, o qual está representado pela área em gradiente de cinza. A linha mais grossa, contínua e inferior delimita o topo do embasamento acústico, isto é, o refletor mais profundo; e a tracejada, aqueles locais cujas feições estratigráficas não são evidentes, devido a um mascaramento por conta da presença



de gás ou da impossibilidade de penetração do sinal, por conta da granulometria grossa. Assim, os refletores mascarados foram traçados com base no prolongamento dos refletores visíveis nas regiões laterais. As linhas pontilhadas representam as sucessivas reflexões de um mesmo sinal sísmico: as múltiplas.

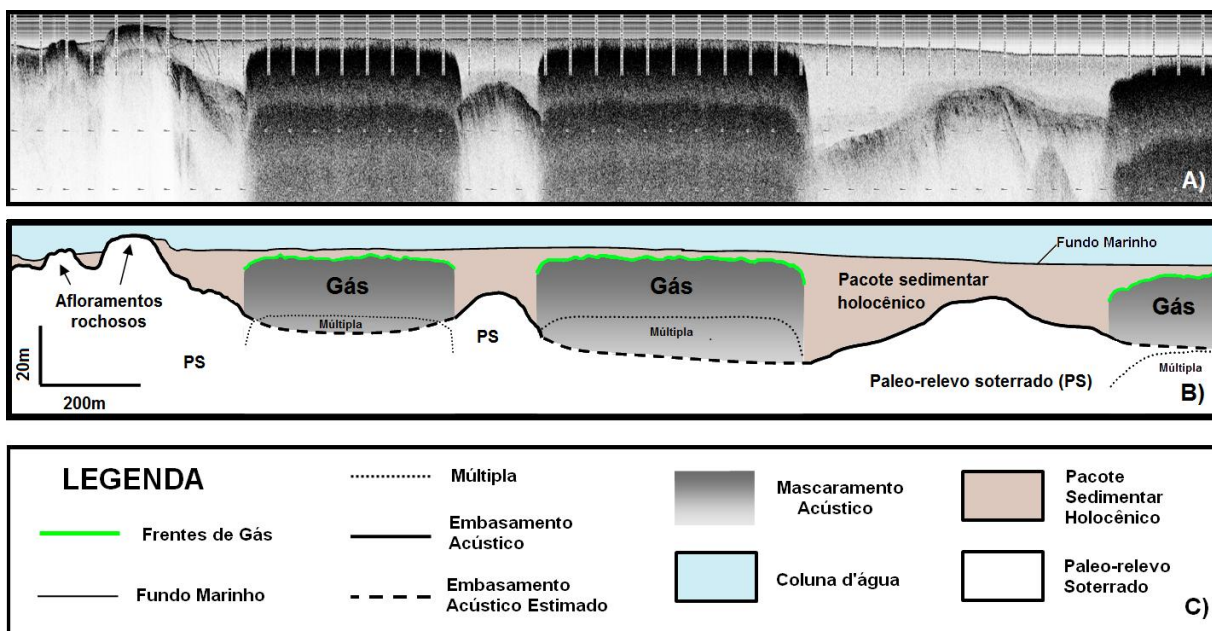


Figura 7 – Trecho do Perfil 5c (A) não interpretado, (B) interpretado e (C) legenda.

### 5.1.1 Tipos de Acumulações de Gás

Garcia-Gil et al (2002), levando em conta as assinaturas sísmicas, geometria e dimensões, classificou as acumulações de gás identificadas em Ría de Vigo, Espanha, em quatro diferentes tipos: Cobertor Acústico, Cortina Acústica, Turbidez acústica e Coluna acústica. Acumulações similares a essas foram identificadas nos perfis sísmicos da BTS, sendo discutidos e exemplificados a seguir. Foi sugerido por esse autor que o principal controle atuando na determinação do tipo de acumulação de gás é o contraste entre a porosidade na fácies em que o gás se acumula e na fácies de vedação. Quando há um alto contraste entre a porosidade da fácies selante e sedimentos contendo gás, a acumulação assume a forma de Cobertor Acústico. No entanto, se a porosidade da fácies selante só é um pouco maior, o limite superior do gás será menos acentuado e a acumulação seria uma

Cortina Acústica. Independentemente da porosidade, uma menor porcentagem de gás nos sedimentos proporcionam a formação de Turbidez e Colunas Acústicas.

### 5.1.1.1 Cobertor Acústico

Garcia-Gil et al. (2002) e Iglesias e Garcia-Gil (2007) consideram as acumulações do tipo cobertor acústico (*Acoustic Blankets*) como aquelas que exibem uma forte reflexão superior, abaixo da qual verifica-se um mascaramento completo dos refletores sísmicos subjacentes. De forma geral, o limite superior dessa acumulação se mostra com uma geometria plana ou levemente inclinada, com a tendência de seguir um plano de acamamento. Um exemplo de cobertor acústico pode ser visto na figura 8.

As acumulações do tipo cobertor acústico caracterizam-se por se estenderem continuamente ao longo de vários quilômetros, em grande parte dos perfis, sendo esparsas as interrupções por janelas. Como dito, esse tipo de ocorrência se dá em situações em que se verifica um grande contraste de porosidade entre as fácies selantes e o sedimento em que o gás está armazenado.

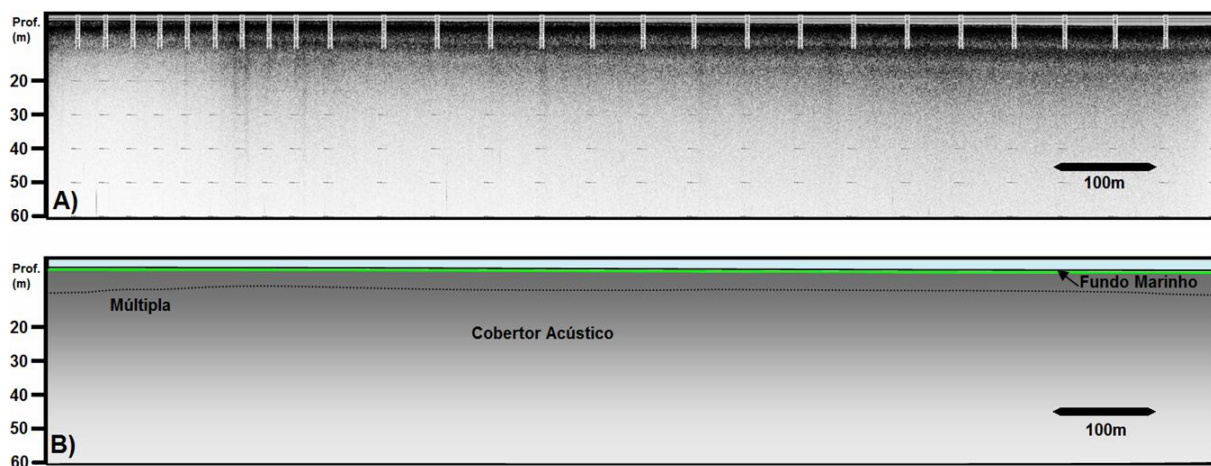


Figura 8 – Acumulação de gás do tipo Cobertor Acústico - Perfil 3m (A) não interpretado e (B) interpretado.

### 5.1.1.2 Cortina Acústica

As acumulações de gás denominados de Cortinas Acústicas (*Acoustic Courains*) (Garcia-Gil et al, 2002) caracterizam-se por um limite superior predominantemente convexo, e pelo mascaramento completo dos refletores subjacentes. A extensão lateral varia de algumas dezenas a poucas centenas de metros, e as laterais da zona de acumulação do gás exibem fortes reflexões mergulhantes (*pull-downs*) devido à redução da velocidade acústica nos sedimentos carregados com gás. Esse tipo de ocorrência, em que o limite superior do gás é menos pronunciado, está presente em situações em que a porosidade das fácies selantes é apenas um pouco maior que a do sedimento em que o gás está armazenado. Um exemplo de perfil apresentando acumulações do tipo Cortina Acústica pode ser visto na figura 9.

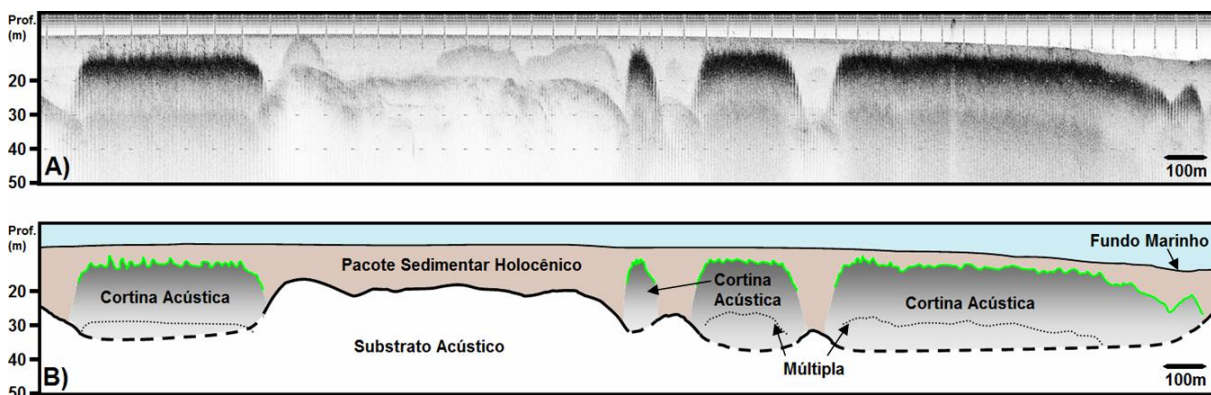
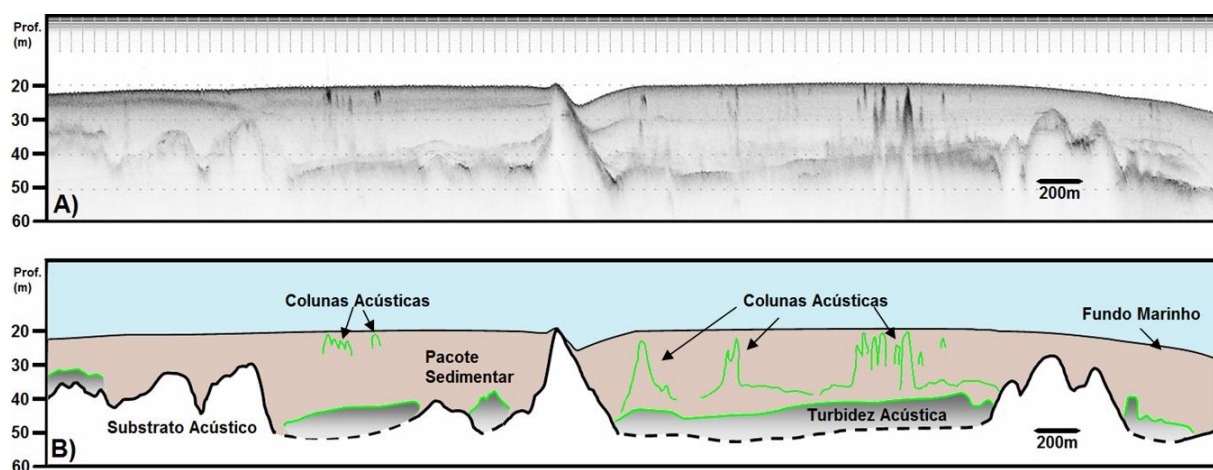


Figura 9 – Acumulações de gás do tipo Cortina Acústica - Perfil II (A) não interpretado e (B) interpretado.

### 5.1.1.3 Turbidez Acústica e Colunas Acústicas

As acumulações de gás do tipo turbidez acústica caracterizam-se por um grau variável de perturbação no registro sísmico, no qual, ocasionalmente, é possível acompanhar os refletores. Os teores de gás são menores nessas acumulações em comparação aos tipos já citados. Este é o efeito que pode ser produzido com apenas 1% em volume de gás no sedimento. Este tipo de ocorrência está exemplificado na figura 10.

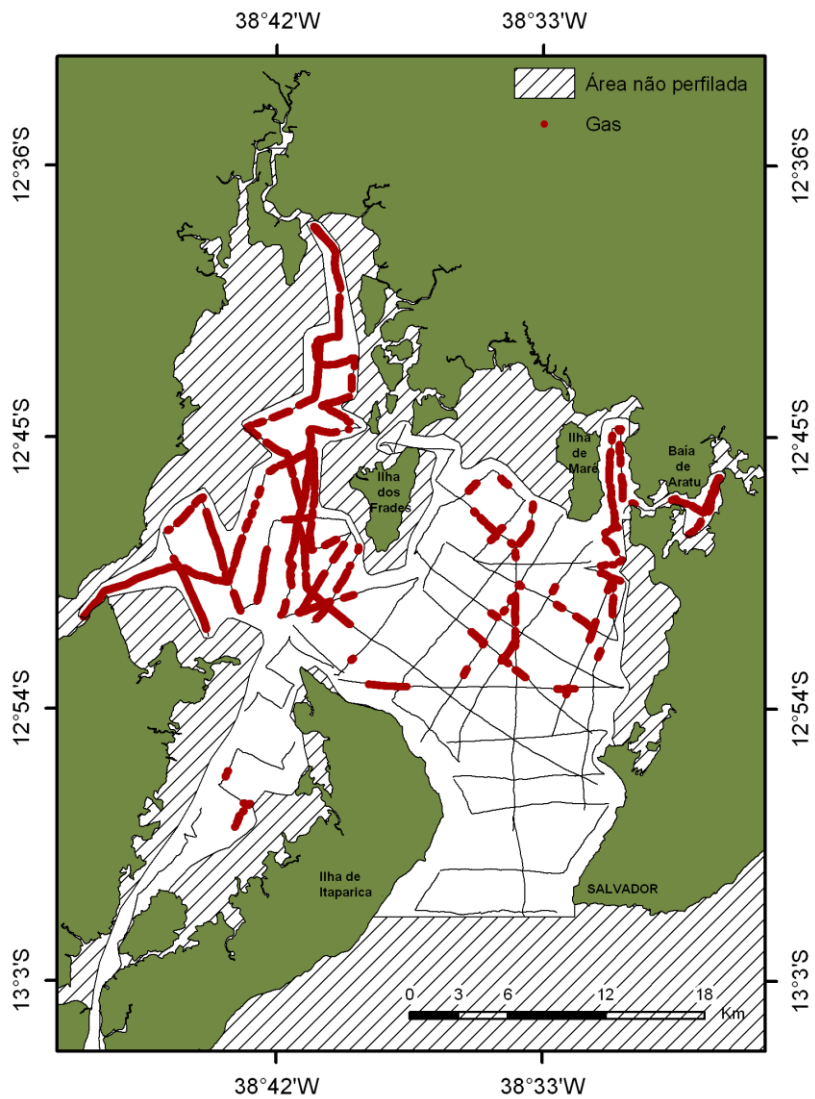
Também foram identificadas, ocasionalmente ocorrências colunares “semi-transparentes”, muito estreitas, que aparecem nas janelas acústicas entre ocorrências mais extensas de acumulações de gás (Figura 10). Nesse tipo de ocorrência a conexão com o nível estratigráfico de onde o gás possivelmente se origina pode às vezes ser estabelecida. O topo da coluna acústica apresenta uma reflexão forte, com inversão de fase, sendo essa acumulação freqüentemente identificada próxima aos tipos descritos anteriormente. Hovland e Judd (1988) descreveram assinaturas sísmicas semelhantes às perturbações colunares transparentes originadas pela migração ascendente de fluidos, provavelmente de gás.



**Figura 10 – Acumulações e gás dos tipos Turbidez Acústica e Colunas Acústicas - Perfil 49(2) (A) não interpretado e (B) interpretado.**

### 5.1.2 Distribuição Espacial das Acumulações de Gás na BTS

A distribuição espacial das anomalias acústicas causadas pela presença de gás livre nos perfis de sísmica rasa para a Baía de Todos os Santos pode ser vista na figura 11. Diversos tipos de acumulação de gás estão presentes em diferentes regiões da BTS. Estas ocorrências são praticamente contínuas nos perfis adquiridos na região noroeste e nordeste da BTS e mais espaçadas e descontínuas na região central e no canal de Itaparica.



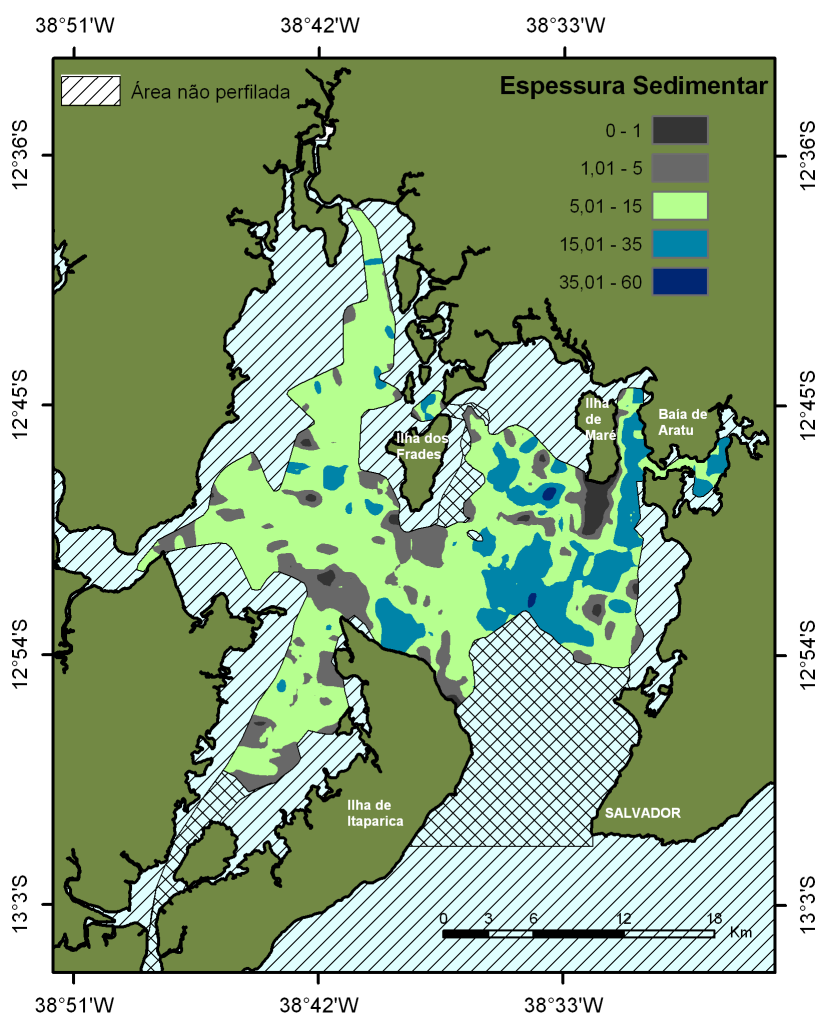
**Figura 11 – Distribuição das anomalias acústicas indicativas da presença de gás livre (pontos vermelhos), nos registros sísmicos.**

### **5.1.3 Espessura dos depósitos sedimentares holocênicos**

A interpretação dos perfis sísmicos permitiu a determinação das espessuras dos sedimentos holocênicos depositados sobre o embasamento acústico, no interior da BTS. A partir desses dados, foi elaborado um mapa de isópacas dos sedimentos que preenchem a Baía de Todos os Santos (figura 22).

Os sedimentos holocênicos acumulados na BTS apresentam uma espessura média de 12,5m. Depósitos sedimentares acusticamente transparentes, com espessuras entre 5 e 15m, ocorrem na quase totalidade da região noroeste da BTS, em grande parte da porção centro-norte da BTS e do canal de Itaparica (Figura 12).

As menores espessuras, entre zero e 5m, ocorrem associadas aos afloramentos rochosos e recifes de corais. Essas regiões estão localizadas ao redor de ilhas, na porção interna do canal de Itaparica e em alguns pontos isolados no interior da BTS.



**Figura 12 – Mapa de Isópacas – Espessura dos pacotes sedimentares acusticamente transparentes da BTS.**

Espessuras intermediárias entre 15 e 35m foram verificadas em grandes áreas da porção central, norte e leste da BTS, baía de Aratu, e norte da ilha de Itaparica, constituindo de pacotes de sedimentos finos, acusticamente transparentes. Pacotes de até 42m de espessura estão presentes em dois pontos da região central e norte da BTS.

No canal de Salvador, sul do canal de Itaparica e leste da Ilha dos Frades, os sedimentos superficiais apresentam uma granulometria mais grossa, refletindo fortemente os sinais acústicos (região GAI da figura 13 – grossos acusticamente impenetráveis). Dessa forma, os perfis registrados nessas regiões não possibilitaram a identificação de refletores abaixo do fundo marinho, e a espessura do pacote sedimentar não pôde ser determinada.

## 5.2 Aspectos Sedimentológicos e Geoquímicos

**Tabela 1 – Teores de Carbonato, Carbono Orgânico Total (COT), Matéria Orgânica (MO), Cascalho, Areia, Silte e Argila encontrados nas 25 amostras superficiais de sedimento, coletadas em locais com presença (CG) e ausência (SG) de acumulações de gás em sub-superfície.**

Amostra	Carbonato	COT	MO	Cascalho	Areia	Silte	Argila	Gás
R1	33,80	0,10	0,18	32,60	66,60	0,80	0,00	SG
R2	24,40	0,83	1,42	23,30	46,70	29,20	0,80	SG
R3	11,60	0,61	1,05	3,30	62,90	28,00	5,80	SG
R4	16,30	1,88	3,25	0,30	11,20	76,50	12,00	CG
R5	26,40	1,87	3,23	14,10	8,00	59,30	18,60	CG
R6	20,70	0,95	1,64	1,20	29,10	61,10	8,60	SG
R7	14,70	1,76	3,04	0,00	6,40	73,30	20,30	SG
R8	11,70	2,19	3,77	0,00	11,90	74,40	13,70	CG
R9	42,20	0,25	0,43	41,70	54,10	4,20	0,00	SG
R10	26,90	1,17	2,02	29,10	31,70	33,80	5,40	SG
R11	21,40	2,06	3,55	0,00	13,00	69,70	17,30	CG
R12	19,20	1,99	3,43	0,00	20,10	74,90	5,00	SG
R13	20,70	2,00	3,45	0,00	9,20	66,30	24,50	CG
R14	37,10	0,57	0,98	26,50	69,60	3,90	0,00	SG
R15	15,83	2,04	3,52	0,60	12,90	62,40	24,10	CG
R16	38,40	1,03	1,78	1,20	52,80	36,50	9,50	SG
R17	17,70	1,49	2,57	25,40	26,90	38,20	9,50	CG
R18	6,90	2,91	5,02	0,00	6,80	80,40	12,80	CG
R19	5,40	0,36	0,62	0,30	24,60	59,20	15,90	CG
R20	4,80	1,87	3,22	0,20	9,60	64,80	25,40	CG
R21	8,24	1,20	2,06	16,00	31,20	40,70	12,10	SG
R22	3,30	2,14	3,69	0,00	11,10	81,50	7,40	CG
R23	2,86	2,34	4,03	0,10	6,10	61,00	32,80	CG
R24	0,76	2,21	3,82	0,30	26,50	56,60	16,60	CG
R25	30,60	1,22	2,10	22,00	36,10	31,80	10,10	SG

### 5.2.1 Textura dos Sedimentos Superficiais

Duas fontes de dados possibilitaram a análise da distribuição espacial da textura dos sedimentos superficiais da BTS. Dados fornecidos pelo BAMPETRO, referentes a coletas realizadas em diversas campanhas ao longo de vários anos, contribuíram para a composição de uma malha amostral mais densa, permitindo uma melhor interpolação de dados para análise da distribuição espacial da textura. Por outro lado, vinte e cinco amostras de sedimento superficial foram coletadas no âmbito deste trabalho, e analisadas no analisador de partículas a laser, permitindo uma maior precisão na caracterização da textura dos sedimentos, ainda que pontualmente. Esta coleta foi planejada em função da distribuição das ocorrências de gás nos perfis sísmicos (amostras R1 a R25).

Mapas mostrando a distribuição espacial dos teores de cascalho, areia, silte e argila, confeccionados a partir da integração dos dados do BAMPETRO e daqueles gerados neste estudo, são mostrados na figura 13 (A, B, C e D, respectivamente) e descritas abaixo.

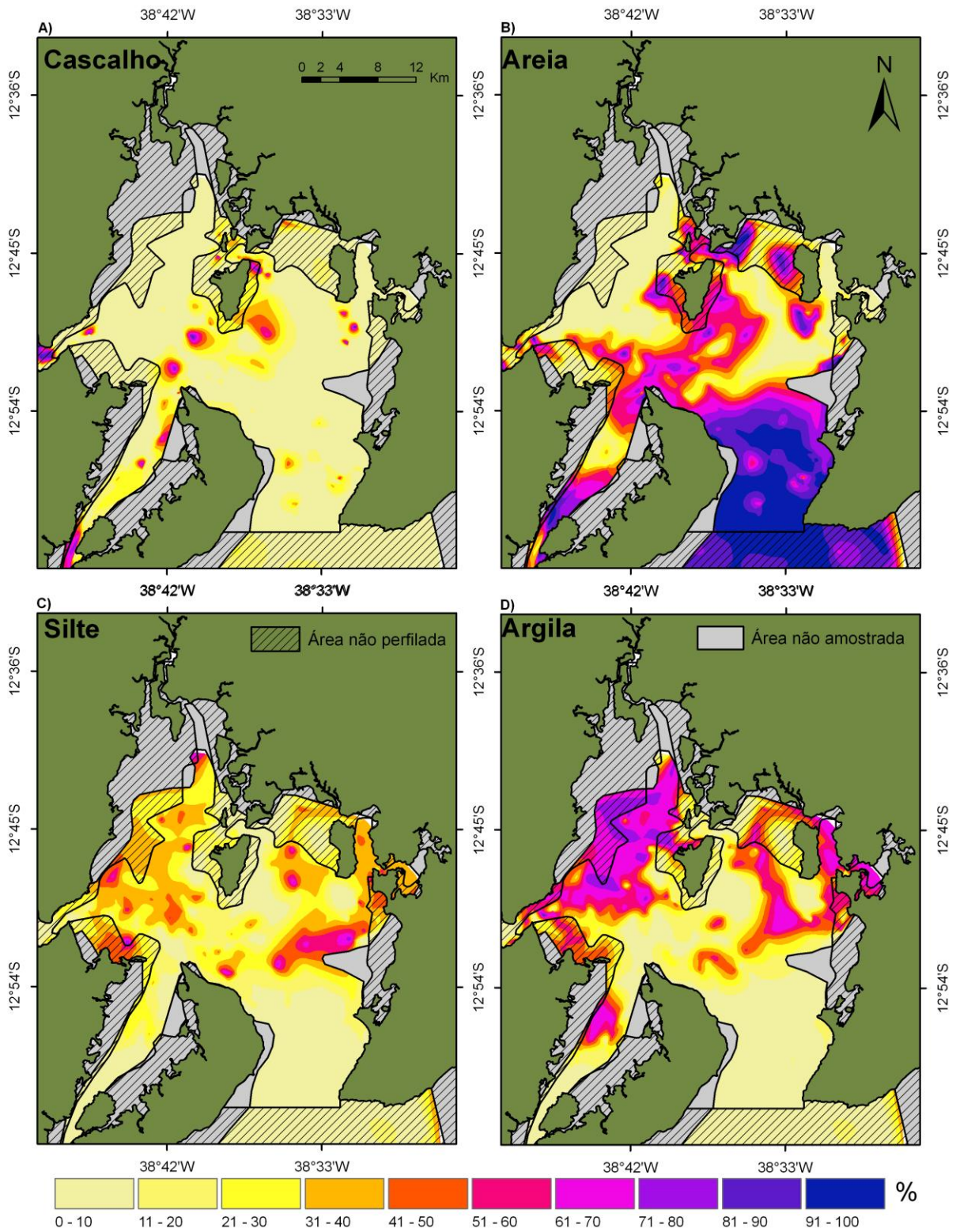
O teor de cascalho varia de zero a 99%. Essa fração é predominante apenas nas regiões em torno da ilha dos Frades e pequenas ilhas acima dessa; ao sul da ilha de Maré; a noroeste da Ilha de Itaparica; e próximo à saída do canal do Paraguaçu e no canal de Salvador. Nas demais regiões da BTS não são encontrados teores significativos.

O teor de areia varia de zero a 100%. As maiores concentrações estão localizadas no canal de Salvador, abaixo da latitude de 12°54'S. Teores elevados de areia também são encontrados no canal de Aratu e nas adjacências das ilhas de Madre de Deus e dos Frades, e nas regiões norte e nordeste a ilha de Itaparica, em associação à fração cascalhosa. Nas porções noroeste e centro-nordeste da BTS a fração areia é praticamente inexistente.

O teor de silte varia de zero a 81%, com concentrações significativas nos trechos onde os teores de argila são elevados. Entretanto, essa fração é a predominante apenas na região imediatamente ao norte do canal de Salvador e em alguns pontos do norte e nordeste da Baía de Todos os Santos.

O teor de argila varia de zero a 88%. Concentrações significativas são encontradas em praticamente toda a porção central do nordeste da BTS e no interior da Baía de Aratu, a leste e sudeste da Ilha de Maré, centro do canal de Itaparica e em um longo trecho longitudinal à linha de costa na porção noroeste da BTS.





**Figura 13 – Distribuição espacial dos teores de (A) cascalho; (B) areia; (C) silte e (D) argila nos sedimentos superficiais de fundo.**

## 5.2.2 Teor de Carbono Orgânico Total (COT)

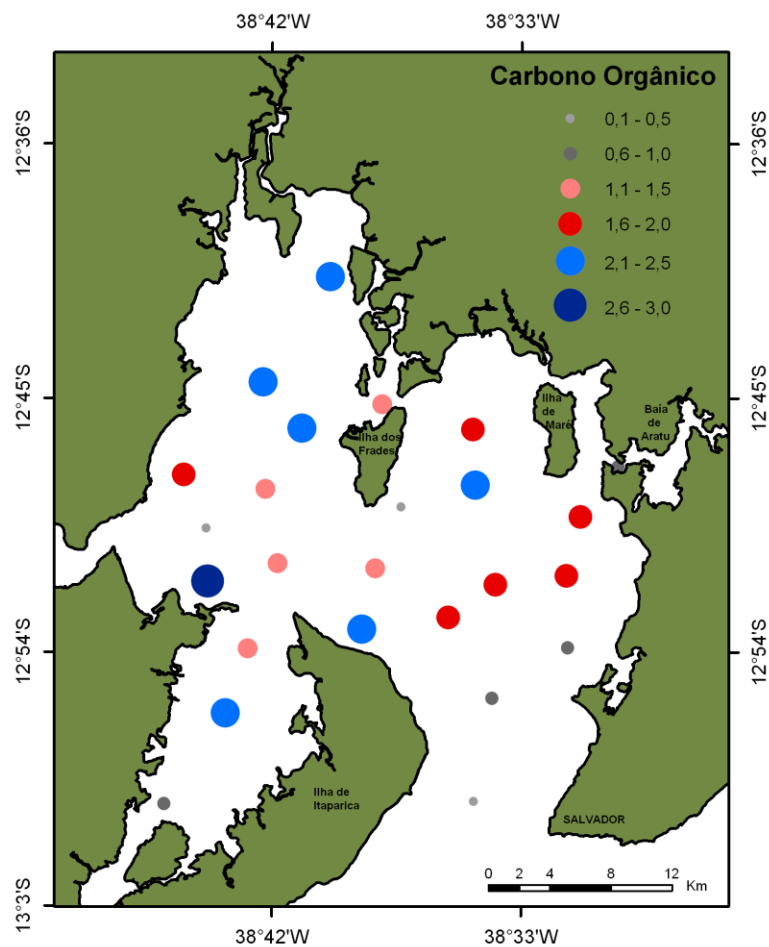


Figura 14 – Teores de carbono orgânico total no sedimento superficial de fundo da BTS.

Os teores de carbono orgânico total variaram de 0,10%, na entrada do Canal de Salvador, a 2,91%, entre o Canal de Itaparica e o Canal do Paraguaçu. Valores iguais ou inferiores a 0,5% foram encontrados em quatro estações: na mais externa do canal de Salvador, à sudeste da Ilha dos Frades e no prolongamento do canal do Paraguaçu no interior da BTS. Valores de COT maiores que 1% são verificados nas demais amostras coletadas, exceto no Canal de Aratu, interior do Canal de Salvador e no ponto mais a sul do canal de Itaparica.

### 5.2.3 Teor de Carbonato

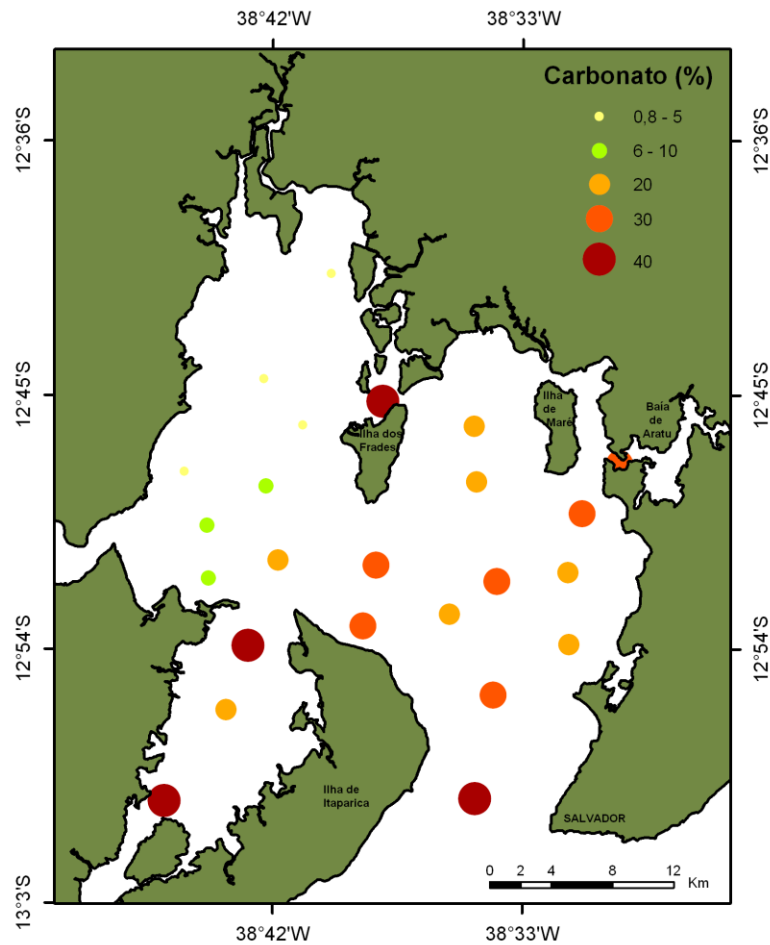


Figura 15 – Teores de carbonato no sedimento superficial de fundo da BTS.

Os teores de carbonato variaram de 0,8 a 42,2. Os maiores teores, acima de 30%, estão localizados na entrada do canal de Salvador, ao sul e norte da Ilha dos Frades e no Canal de Itaparica. Teores inferiores a 10% são encontrados na porção noroeste da BTS.

### **5.3 Zonas de Ocorrência e Não-Ocorrência de Gás na BTS**

Para uma melhor caracterização das acumulações e das regiões de ocorrência de gás, a área imageada da BTS foi dividida em seis zonas (figura 16); três zonas com ocorrências de gás livre no sedimento, e três zonas sem evidências de ocorrências de gás livre:

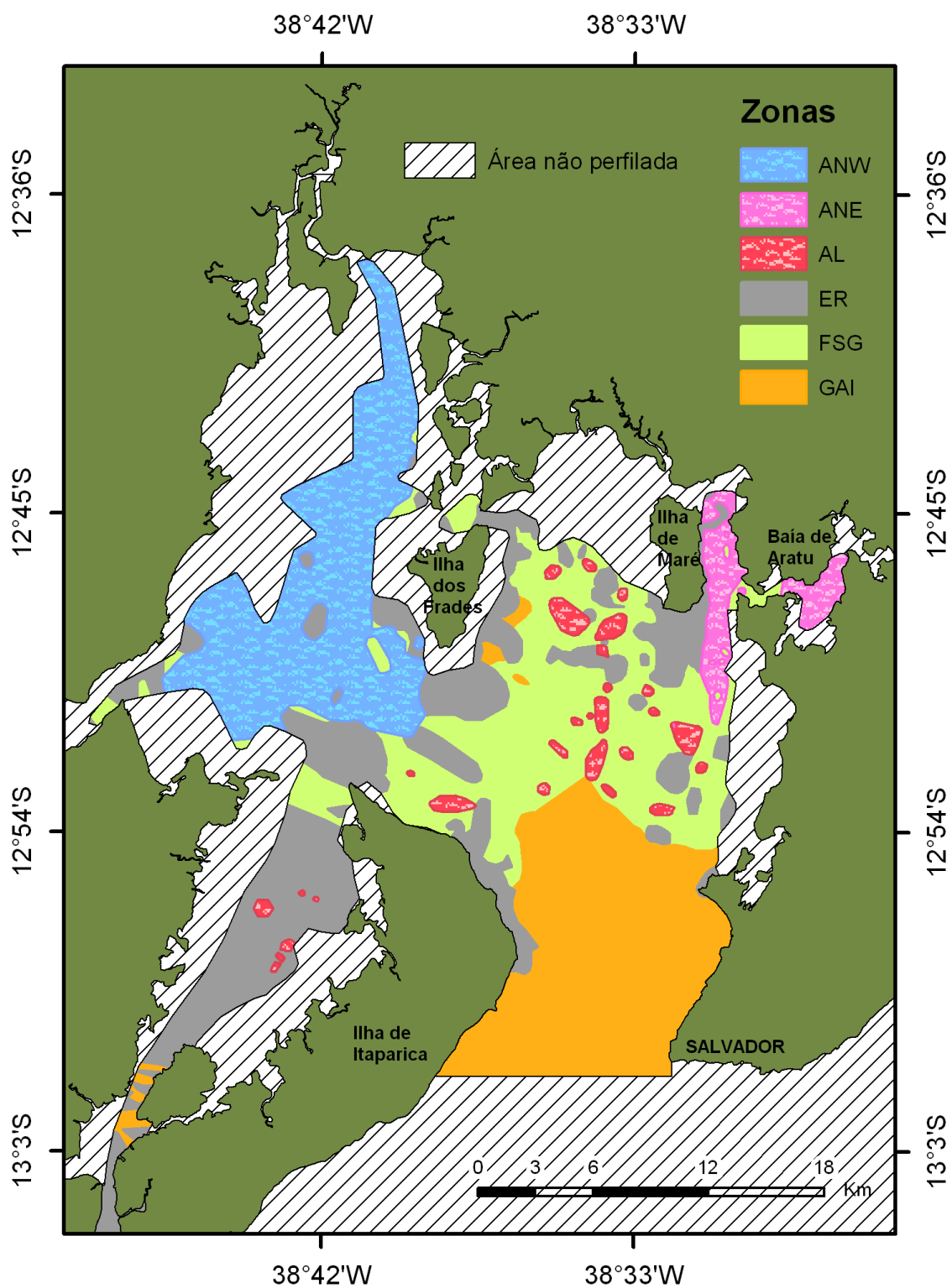
- (1) Zona de Acumulação de gás da porção Noroeste da BTS (ANW);
- (2) Zona de Acumulação de gás da porção Nordeste da BTS (ANE);
- (3) Zona de Acumulações Localizadas de gás da porção centro-norte da BTS (AL);
- (4) Zonas de Sedimentos Finos Sem Gás (FSG);
- (5) Zonas de Embasamento Acústico Raso (ER);
- (6) Zonas de Sedimentos Grossos Acusticamente Impenetráveis (GAI).

A figura 17 mostra a distribuição de frequências de ocorrência de gás nas zonas ANW, ANE e AP em função da profundidade no pacote sedimentar, medida abaixo da interface sedimento-água. De modo geral observa-se que as ocorrências na zona ANW são consideravelmente mais rasas que nas zonas ANE e AL.

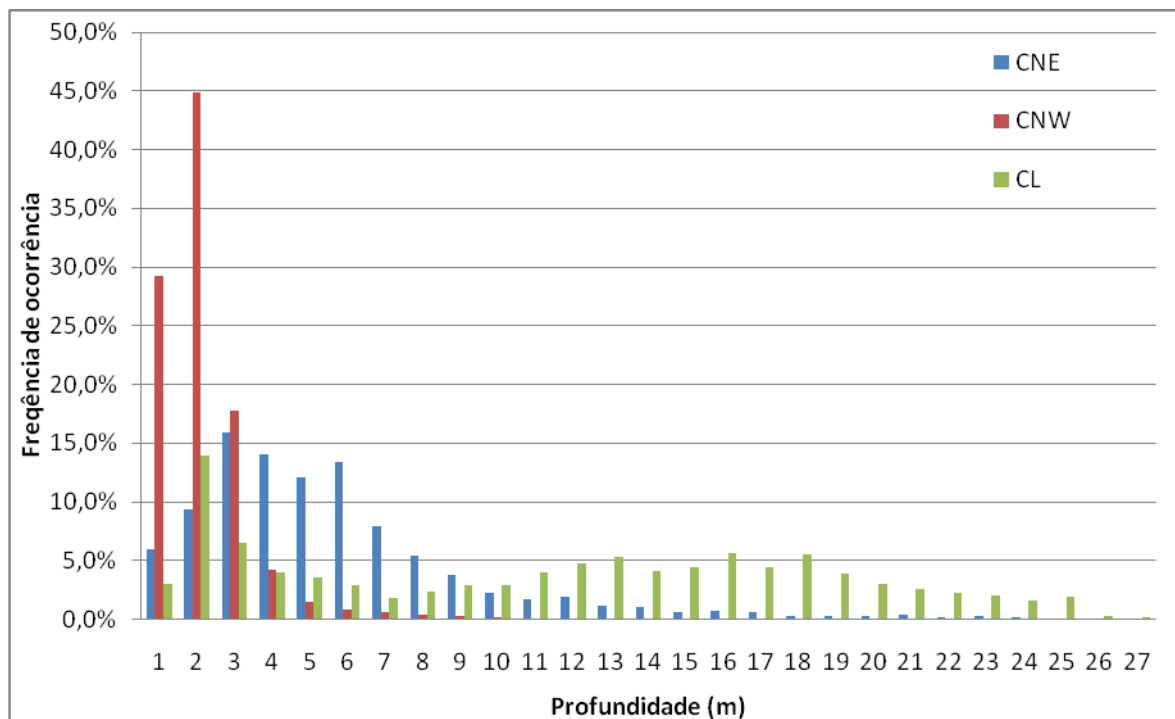
#### **5.3.1 Zona de Acumulação de Gás Noroeste (ANW)**

A zona ANW é a mais extensa das zonas de ocorrência de gás mapeadas, e compreende a quase totalidade da área imageada na região noroeste da BTS, totalizando cerca de 125km<sup>2</sup>. Caracteriza-se como uma região de batimetria rasa, com profundidades inferiores a 5m na porção norte dessa zona e entre 5 e 10m na sua porção sul.

Os perfis sísmicos adquiridos para a zona ANW revelam a presença de depósitos sedimentares holocênicos acusticamente transparentes. O principal tipo de acumulação nesta zona é o Cobertor Acústico, ocorrendo em profundidades muito rasas, que alcançam um máximo de 11 m abaixo da interface sedimento-água.



**Figura 16 – Distribuição das diferentes zonas da BTS: Acumulação de Gás da Porção Noroeste, (ANW); Acumulação de Gás da Porção Nordeste (ANE); Acumulações Localizadas de Gás (AL); Embasamento Raso (ER); Sedimentos Finos Sem Gás (FSG); e Sedimentos Grossos Acusticamente Impenetrável (GAI).**



**Figura 17 - Distribuição de frequências em função da profundidade das acumulações de gás abaixo da interface ar-água nas zonas ANW, ANE e AL.**

Na maior parte desta zona as acumulações de gás praticamente coincidem com o leito submarino, como visto no perfil 3d (Figura 18). Cerca de 90% das ocorrências de gás encontram-se em profundidades inferiores a 3m abaixo da interface sedimento-água. Desses, quase 30% não alcançam 1m abaixo do fundo marinho. As ocorrências são contínuas e estão presentes em praticamente toda a extensão dos perfis. As poucas janelas existentes, nas quais não se verifica a presença de gás, coincidem com aqueles trechos onde o embasamento acústico encontra-se mais raso. Em geral, as ocorrências de gás da ANW desaparecem quando a espessura do pacote sedimentar é igual ou menor a 5 m.

O Perfil 3d (Figura 18) exemplifica os registros sísmico para a zona ANW e representa uma situação recorrente nessa região: perfis quase ou totalmente mascarados por gás, predominantemente em acumulações do tipo cobertor acústico, cujas frentes são identificadas praticamente em coincidência com o fundo marinho. A espessura sedimentar mínima, estimada com base no substrato rochoso evidente nas duas janelas, situa-se entre 15 e 20m de profundidade.

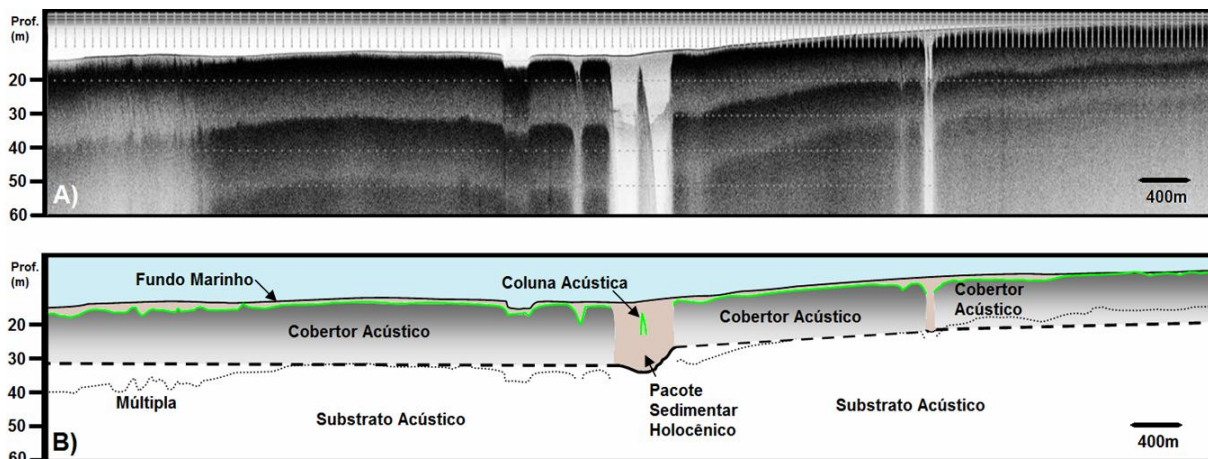


Figura 18 - Zona ANW - Perfil 3d (A) não interpretado e (B) interpretado.

### 5.3.2 Zona de Acumulação de Gás Nordeste (ANE)

A zona ANE inclui duas acumulações de gás de extensões intermediárias, localizadas no interior da baía de Aratu e em suas adjacências, a leste e sudeste da Ilha de Maré, somando 21km<sup>2</sup> de extensão. A profundidade da coluna d'água varia nessa região, sendo bastante rasa (< 5m) na lateral da Ilha de Maré e interior da Baía de Aratu e mais profunda a sudeste da Ilha, alcançando mais de 20m de profundidade. Na zona ANE as acumulações de gás ocorrem em camadas relativamente mais profundas do sedimento, quando comparadas a ANW, alcançando 26m abaixo da interface sedimento-água, enquanto ~60% das ocorrências se situam entre 2 e 6m abaixo desta interface. As ocorrências são majoritariamente do tipo Cortina Acústica, e as janelas, freqüentes, normalmente estão presentes nos trechos onde a espessura do pacote sedimentar holocênico é inferior a 15m.

O perfil 1z (figura 19) está localizado no interior da Baía de Aratu, e nos mostra a ocorrência de diversas acumulações de gás do tipo cortina acústica. As características das ocorrências na zona ANE, como frentes mais irregulares e reflexões mergulhantes nas laterais, são evidentes nesse perfil. O gás está presente em profundidades abaixo do sedimento de cerca de 5 - 10m, as acumulações possuem de 50 a 600m de comprimento, sendo frequentemente interrompidas por janelas, que normalmente estão associadas a diminuições nas espessuras sedimentares (para < 15m), devido à ascensão do substrato rochoso.

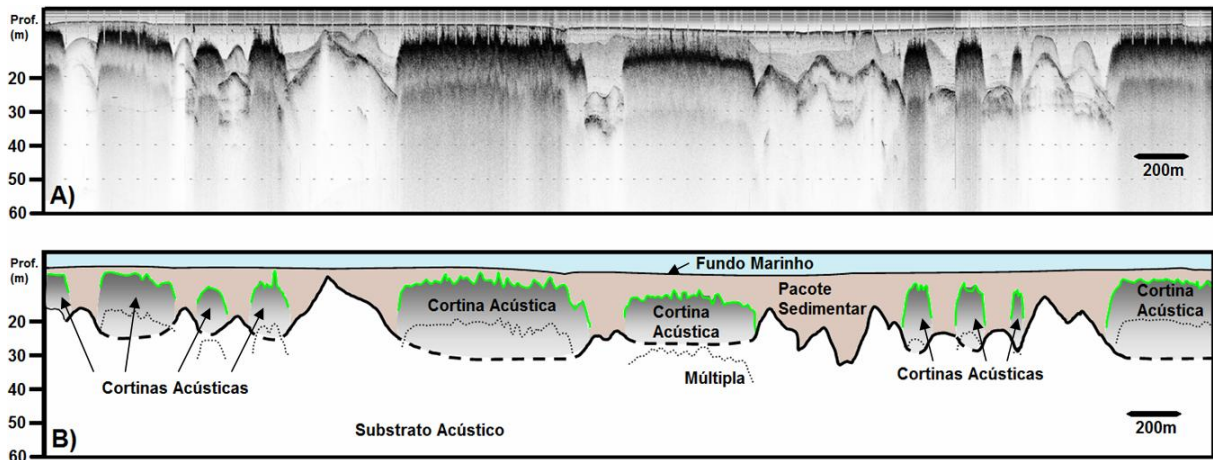


Figura 19 - Zona ANE - Perfil 1z (A) não interpretado e (B) interpretado.

### 5.3.3 Zonas de Acumulação de Gás Localizadas (AL)

Diversas ocorrências localizadas de gás foram identificadas da região central-norte da BTS, entre as Ilhas de Maré e dos Frades, ao norte da Ilha de Itaparica e no Canal de Itaparica, exibindo uma área total de 15km<sup>2</sup>. Nessas regiões as ocorrências de gás são predominantemente do tipo Turbidez Acústica. Foram ainda identificadas acumulações dos tipos Cobertor Acústico e Coluna Acústica, essa última em íntima associação com a acumulação do tipo Turbidez Acústica (Figura 20). Os Cobertores Acústicos ocorrem apenas no extremo norte da BTS e no Canal de Itaparica. Na zona AL, esses são ainda menos extensos que os identificados na zona ANW, alcançando poucas centenas de metros. Por corresponder às ocorrências esparsas, espalhadas por diversas regiões da BTS, as acumulações ocorrem em profundidades muito variadas abaixo do sedimento: gás localizado no sedimento em profundidades de 0 a 25m ocorrem numa mesma proporção, de 2,5 a 5%, exceto por um pico de ~13% em 2m abaixo do fundo marinho. As ocorrências são delimitadas pela isópaca de 15m.

O perfil 7c (2) (Figura 20) nos traz informações sobre a porção central da BTS, onde boa parte das ocorrências da Zona AL está localizada. Na segunda metade do perfil, é nota-se a ocorrência de acumulações de gás do tipo turbidez acústica, em associação a



ocorrências de Colunas Acústicas. As acumulações vistas no perfil 7c ocorrem no local de maior espessura sedimentar (~30m).

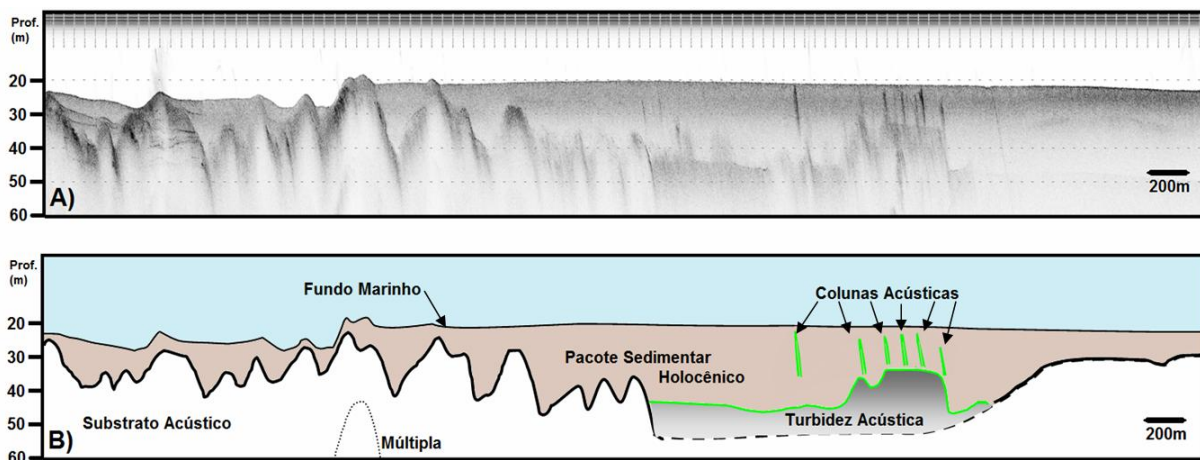


Figura 20 - Zona ER e AL - Perfil 7c (2) (A) não interpretado e (B) interpretado.

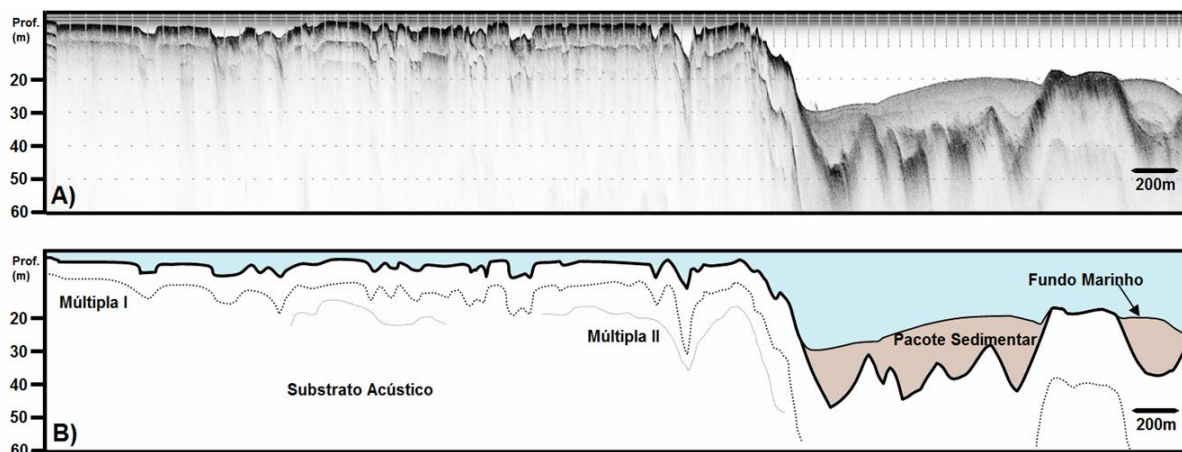
### 5.3.4 Zonas de Sedimentos Finos Sem Gás (FSG)

A zona FSG representa aqueles locais em que, apesar da presença de depósitos sedimentares holocênicos acusticamente transparentes de granulação fina, com espessura superior a 5m, o mascaramento acústico nos registros com perfilador de sub-fundo indicativos da presença de gás livre em concentrações significativas está ausente (Figura 21). Estão incluídas nessa zona extensas regiões do centro e norte da BTS; canal de Itaparica; e em algumas das janelas entre ocorrências de gás, principalmente nas zonas ANE e AL. São regiões onde a profundidades da lâmina d'água e superior a 10m, podendo chegar a mais de 40m. A espessura do pacote sedimentar holocênico nessa zona varia de 5 a 35m.

### 5.3.5 Zona de Embasamento Acústico Raso (ER)

A zona denominada de ER representa aquelas regiões onde a espessura do pacote sedimentar holocênico é igual ou inferior a 5m e para os quais não foram identificadas

acumulações de gás, funcionando às vezes como barreiras entre as ocorrências de acumulação vizinhas.



**Figura 21 – Zonas FSG e ER - Perfil 7c (1) (A) não interpretado e (B) interpretado.**

A primeira metade do perfil 7c (1) (Figura 21) mostra um afloramento rochoso, possivelmente associado a recifes de coral e sedimentos areno-cascalhosos, incluídos na Zona de Embasamento Raso. Na porção final do perfil, juntamente com um aumento batimétrico brusco, o embasamento rochoso se rebaixa, sendo coberto por camadas de sedimentos finos de 10 a 20m de espessura. Porém, não são encontradas evidências da presença de teores significativos de gás nesse sedimento, incluindo-se na Zona FSG.

### **5.3.6 Zonas de Sedimentos Grossos Acusticamente Impenetráveis (GAI)**

A Zona GAI corresponde àqueles trechos onde a cobertura de sedimentos superficiais, e o próprio pacote de sedimentos holocênicos, são constituídos de sedimentos grossos, o que dificulta a penetração do sinal sísmico e a própria acumulação de gás devido a ausência de sedimentos finos selantes. Como dito anteriormente, foram incluídas nessa Zona as regiões do Canal de Salvador, sul do canal de Itaparica e leste da Ilha dos Frades. Altos teores de sedimentos grossos também são encontrados nas regiões ao redor das ilhas, na porção norte da BTS e no canal de Itaparica. Porém, esses não foram classificados como AI, pois não existem registros sísmicos em algumas dessas regiões, e, onde há, a

penetração do sinal e identificação de refletores subjacentes não foi totalmente impedida. A utilização de outros equipamentos sísmicos, como o boomer ou sparker, nessa região poderia gerar dados mais satisfatórios, possibilitando a identificação dos refletores e de possíveis ocorrências de gás.

O perfil 10a (Figura 22), registrado no canal de Salvador, mostra uma forte reflexão dos sinais do perfilador de subfundo pelo leito submarino, o que impossibilita a penetração do sinal acústico e caracterização da sub-superfície, condição da Zona GAI. Os registros para essa região mostram feições do tipo *sandwaves*, indicando a presença de sedimentos arenosos. As profundidades da coluna d'água chegam a 85m.

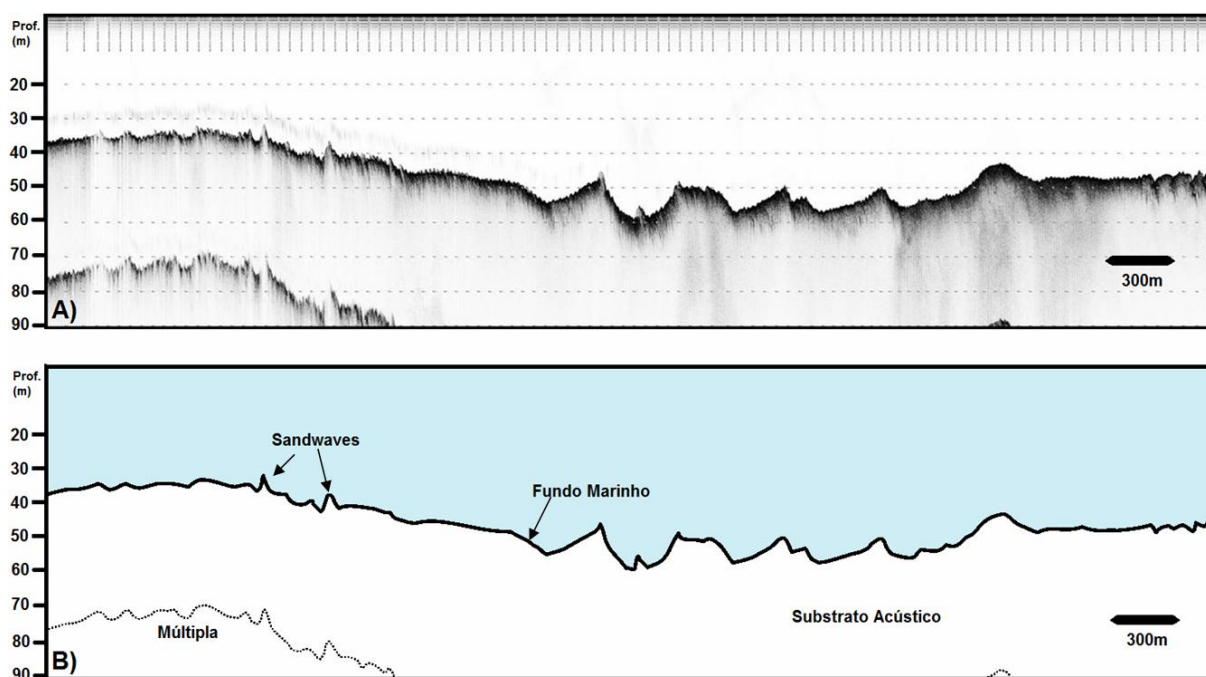


Figura 22 - Zona GAI - Perfil 10a (A) não interpretado e (B) interpretado.

#### 5.4 Composição dos hidrocarbonetos no gás

A análise da composição de hidrocarbonetos presentes no gás mostrou que os teores de metano (C1), para a zona ANW, variaram de 9 a 28677 ppm, como pode ser visto na tabela 2. Os demais hidrocarbonetos somados não ultrapassaram 4ppm, exceto na estação 9, em que chegam a mais de 14,5 ppm. Para as estações 7, 8 e 9, foram coletadas

duas amostras: uma rasa (ponto R) e outra entre 1 e 1,7m abaixo da interface sedimento/água (ponto N). Em todos os casos, a concentração de metano em ppm encontrada foi pelo menos duas ordens de grandeza maior que a dos demais hidrocarbonetos.

Análises de composição e teores para outros gases, como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub> não puderam ser realizadas, devido a limitações do laboratório.

**Tabela 2 - P1 – Profundidade da coluna d’água no momento da coleta; P2 – Profundidade da coleta de sedimento abaixo do fundo marinho; C1 – Metano; C2 – Etano; C<sub>3</sub>H<sub>4</sub> – Eteno; C<sub>3</sub> – Propano; C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> – Propeno; IC<sub>4</sub> – Iso-Butano; NC<sub>4</sub> – *n*-Butano; C<sub>4</sub>H<sub>8</sub> – 1-Buteno; IC<sub>5</sub> – Iso-Pentano; NC<sub>5</sub> – *n*-Pentano; C<sub>5</sub>+ - Hexano+; C<sub>1</sub>/(C<sub>2</sub>+C<sub>3</sub>) – Parâmetro de Bernard. Concentrações em ppmv. \* 1<sup>a</sup> coleta (16/09/2010), \*\* 2<sup>a</sup> coleta (29/09/2010). Amarelo – concentrações anômalas.**

PONTO	P1	P2	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	IC <sub>4</sub>	NC <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	IC <sub>5</sub>	NC <sub>5</sub>	C <sub>6</sub> +	C <sub>1</sub> /(C <sub>2</sub> +C <sub>3</sub> )
R3*	4	1,3	21	0,06	0,21	0,04	0,08	0,05	0,05	0,02	0,04	0,02	2,96	210
R4*	7	1,3	34	0,14	0,52	0,14	0,22	0,03	0,05	0,04	0,03	0,04	2,85	121
R7*	6	1,3	390	0,18	0,29	0,13	0,09	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	2,61	1.258
R8**	6	0,7	9	0,07	0,25	0,09	0,10	0,03	0,03	0,02	0,13	0,26	1,74	56
R9*	5	1,5	348	4,66	0,35	0,15	0,12	0,02	0,04	0,03	0,02	0,03	5,74	72
N7**	7	2,3	28.677	0,34	0,60	0,34	0,16	0,03	0,07	0,02	0,02	0,05	2,11	42.172
N8**	6	2,4	25.882	0,31	0,62	0,33	0,15	0,03	0,06	0,02	0,01	0,05	1,96	40.441
N9**	7	2,4	18.323	11,57	0,51	0,28	0,13	0,02	0,06	0,06	0,02	0,05	1,81	1.546

## 5.5 Isótopos de carbono do gás Metano

As análises isotópicas só puderam ser realizadas naquelas amostras em que o teor de metano no sedimento foi superior a 500 ppm. Os valores de δ<sup>13</sup>C determinados para o metano foram de -77,3‰ para o ponto N7; -77‰ para o ponto N8 e -81,2‰ para o N9.

## 6 DISCUSSÃO

### 6.1 *Concentrações de metano livre em sedimentos transicionais/marinhos*

Concentrações anômalas de metano foram encontradas em 5 dos 8 testemunhos, coletados na Zona de Acumulação de gás do noroeste (ANW) da Baía de Todos os Santos. Amostras apresentando concentrações de metano livre acima de 90 ppm podem ser consideradas anômalas, uma vez que os valores *background* de metano em ambientes costeiros similares se situam normalmente abaixo de 30ppm (Garcia-Garcia et al, 2007). Os testemunhos para a coleta das amostras foram obtidos em locais coincidentes com anomalias acústicas previamente identificadas nos perfis de sub-fundo. Naquelas estações (7, 8 e 9) em que a concentração de gás foi determinada em duas profundidades, os teores de metano apresentaram um significativo aumento com aumento da profundidade. Isso é esperado, pois a metanogênese ocorre tipicamente abaixo da base da zona de sulfato-redução. Conseqüentemente amostras nas porções mais rasas de testemunhos via de regra contêm menores concentrações de gás que amostras mais profundas (Garcia-Garcia et al, 2007). Dessa forma, é esperado que, a maiores profundidades, também sejam encontradas concentrações elevadas de metano nas estações amostrais 3 e 4.

Os teores de metano encontrados no sedimento confirmam a teoria de que as anomalias acústicas presentes nos registros de sísmica rasa na BTS são causadas pela presença de concentrações elevadas de gás livre no sedimento (acima de 0,01% ou 100ppm), e de que esse gás é majoritariamente composto por metano.

A comparação de dados sobre a concentração de metano em sedimentos de diferentes regiões do globo é dificultada pela não uniformidade dos métodos de determinação apresentados na literatura, como também pelo fato destas concentrações variarem com a profundidade, abaixo da interface sedimento/água. Além disso, diversos trabalhos (Kitidis et al, 2007; Borowski et al, 1997; Linke et al, 2010; Krabbenhoef et al, 2010; Goody & Darling, 2005) reportam teores de metano dissolvidos na água intersticial, ao invés do conteúdo de gás livre. O teor total de metano não fornece muita informação a respeito das propriedades acústicas do sedimento, as quais são controladas pelo volume de

gás livre; enquanto que a formação de bolhas exige condições de supersaturação do metano (Abegg e Anderson, 1997). Ao mesmo tempo, a determinação apenas do gás intersticial subestima grosseiramente o teor de gás do sedimento, especialmente quando este teor é alto, apesar de ser útil para monitorar a composição relativa do gás (Kvenvolden et al, 2010).

Os teores de metano e outros hidrocarbonetos livres no sedimento, encontrados neste trabalho, estão de acordo com os valores descritos na literatura para sedimentos costeiros e marinhos de diversas partes do mundo.

Mazumdar et al (2009), através de análise por cromatografia a gás, mediu a concentração de metano em *headspace* em 8 testemunhos coletados na costa oeste da Índia. As medições foram realizadas para várias amostras coletadas em intervalos de 5-10cm ao longo destes testemunhos, cujo comprimento total variou entre 67,5cm e 192,5cm. As concentrações de metano encontradas variaram de 2 – 20ppm, mostrando aumento com a profundidade. Em apenas uma das amostras, coletada na zona transicional sulfato-metano foi encontrado o valor de 530ppm (0,053%). O  $\delta^{13}\text{C}$  do metano variou de -42,2 a -88,9‰.

Garcia-Garcia et al (2007) analisou as concentrações de metano em diversas amostras coletadas em testemunhos em 20 estações no oeste do Mar Adriático Ocidental e 24 na porção central. Estes testemunhos até 5 m. A concentração de hidrocarbonetos,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  no *headspace* foi analisada por cromatografia gasosa. Das 20 estações amostradas na porção oeste do Mar Adriático, 5 apresentaram concentrações de metano acima de 90ppm. Desses, 3 locais apresentaram concentrações  $>10^4$  ppm, incluindo uma amostra situada a apenas 30cm abaixo da interface sedimento/água. O metano constituiu  $>99\%$  do gás presente no sedimento, enquanto concentrações traço de  $\text{C}_2$  e outros hidrocarbonetos pesados foram encontradas. A concentração de  $\text{C}_2$  ficou entre 0,00 e 1,02ppm. O  $\delta^{13}\text{C}$  do metano das 5 amostras com maiores teores, variou entre -70,0 e -91,9‰. Para a porção central do Mar Adriático, uma concentração de  $7,9 \times 10^4$  ppm foi encontrada em uma amostra, a 2,4m abaixo da interface sedimento/água. A segunda maior concentração encontrada nesta área central foi de 884ppm, a 300cm da interface sedimento/água. As concentrações de outros hidrocarbonetos foram tão baixas quanto na porção oeste.

Lorenson et al (2008) realizou análises para gás intersticial, por cromatografia gasosa, em 67 amostras de testemunhos coletados no Golfo do México. As amostras foram coletadas em profundidade abaixo da interface sedimento/água que variaram de 0,2 a 379,21 m. Concentrações significativas de metano foram encontradas desde os primeiros

centímetros de sedimento, até centenas de metros abaixo do leito submarino, predominando valores da ordem de  $10^3$  e  $10^4$  ppm. O maior valor encontrado foi de 53,690 ppm, a 12,45m abaixo do fundo marinho. Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  de metano variaram de -70,8 a -84,3‰.

Abegg e Anderson (1997) aplicaram a técnica de tomografia computadorizada na análise de estruturas sedimentares marinhas de sedimentos lamosos da Baía de Eckernfoerde, Adriático Ocidental, possibilitando a determinação quantitativa de características como conteúdo de gás livre e tamanho de bolhas. As análises de dois testemunhos permitiram a construção de perfis contínuos de concentração do gás (%) X profundidade (cm) para esses locais (0-70cm e 60 – 170cm abaixo do fundo marinho). Foram encontradas concentrações de gás livre que chegaram a 4,5%, porém na maior parte das medições, as concentrações se situaram em torno de 0,5%.

## **6.2 Origem do gás na BTS**

Os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  encontrados para o metano (entre -77 e -81,2‰) na zona ANW da BTS indicam uma origem biogênica para esse gás. De modo geral para cada composto, as moléculas com a menor massa isotópica se difundem e reagem mais rapidamente, e, dessa forma, são utilizadas mais freqüentemente que as espécies isotopicamente mais pesadas. Assim a utilização preferencial do  $^{12}\text{C}$  pelas bactérias durante a metanogênese resulta em uma forte depleção em  $^{13}\text{C}$  no  $\text{CH}_4$  bacteriano, em relação aos seus substratos precursores (Whiticar, 1999; Blair, 1998; Borowski et al, 1997). Como pode ser visto na figura 23 (extraída de Blair, 1998), baseada em uma compilação de trabalhos sobre  $\text{CH}_4$  biogênico, o  $\delta^{13}\text{C}$  varia amplamente em sedimentos, de -110 a -50‰, porém as maiores freqüências se situam entre -90 e -60‰, como os valores encontrados no presente trabalho.

Além do fracionamento isotópico, a razão  $\text{C}_1/(\text{C}_2+\text{C}_3)$  (parâmetro de Bernard) pode também fornecer um indicativo da origem do gás, sendo tipicamente da ordem de  $10^3 - 10^5$  (valores encontrados neste trabalho) para gás de origem biogênica e menor que 50 para gases de origem termogênica. Na zona de consumo de  $\text{CH}_4$  (zona de sulfato-redução), esses valores podem cair a menos que 10 (Whiticar, 1999).

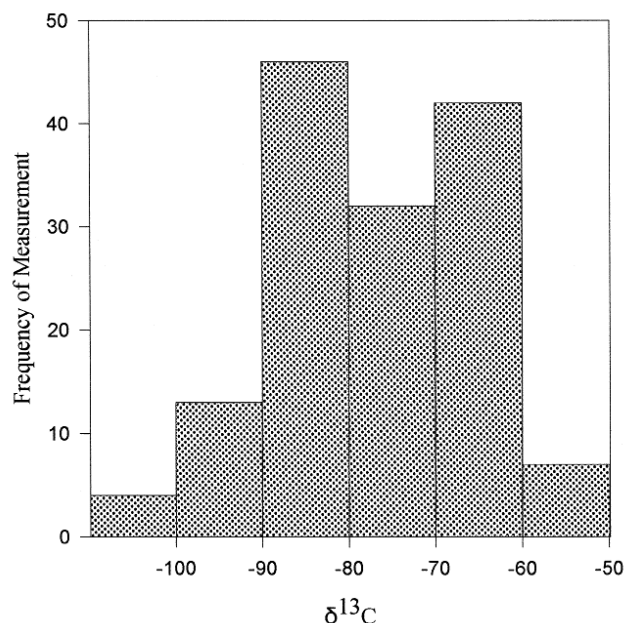
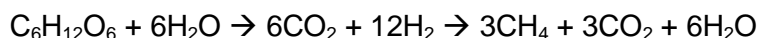


Figura 23 – Frequência de medidas de valores de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  biogênico para sedimentos (extraída de Blair, 1998).

### 6.3 Mecanismos de formação do metano biogênico

A produção de metano e outros hidrocarbonetos como produto final do catabolismo é uma característica geral, definidora e única de um grupo de arqueobactérias: os organismos metanogênicos (Boone et al, 1993). Os organismos metanogênicos são anaeróbios obrigatórios, não tolerando sequer traços de  $\text{O}_2$ , cujo metabolismo se desenvolve apenas em níveis redox de  $\text{Eh} < -200\text{mV}$  (Whiticar, 1999). Organismos metanogênicos dependem de um conjunto limitado de substratos, como  $\text{H}_2$  e acetato, motivo pelo qual são dependentes de outros microorganismos fermentadores (Blair, 1998), os quais quebram as moléculas maiores num processo de remineralização da matéria orgânica, culminando na produção de metano (Whiticar, 1999).

A reação dominante de fermentação microbiana da matéria orgânica em sistemas de água salgada é a redução de  $\text{CO}_2$  (Blair, 1998; Borowski et al, 1997):





Segundo Rice e Claypool (1981), uma sucessão ecológica de organismos metabolicamente diferentes se estabelece no sedimento, em que os menos eficientes se situam a maiores profundidades. As interações entre fatores ecológicos e sedimentológicos resulta em três ambientes biogeoquímicos distintos, cada um dos quais é caracterizado por uma forma dominante de metabolismo respiratório, sendo elas: zona aeróbica; zona anaeróbica de sulfato-redução; e zona anaeróbica de redução carbonática (produção de metano). A sucessão ecológica de ecossistemas microbianos em um ambiente sedimentar marinho/transicional rico em matéria orgânica está ilustrada na figura 24.

A respiração aeróbica utilizando matéria orgânica é o processo gerador de energia mais eficiente, ocorrendo na coluna d'água e na porção mais superior do sedimento. Nesse processo, o oxigênio é rapidamente consumido, e sua demanda excede a reposição, particularmente em áreas de alta taxa de sedimentação. Assim, o  $O_2$  se esgota poucos centímetros abaixo da interface sedimento-água.

A partir da depleção de  $O_2$ , a sulfato-redução torna-se a forma de respiração dominante, devido às altas concentrações de sulfato nesse ambiente (0,028M na água do mar). Adicionalmente, poucas espécies microbianas são capazes de tolerar o  $H_2S$ , produto final da sulfato-redução. Nessa zona, metano é consumido por respiração anaeróbia bacteriana.

A produção rápida de metano tem início imediatamente após a redução da concentração de sulfato dissolvido, abaixo da zona de sulfato-redução.

De forma geral, a produção de metano biogênico requer ambientes que apresentem (Garcia-Garcia et al, 2007; Rice e Claypool, 1981; Boone et al, 1993):

- (1) anoxia;
- (2) depleção em sulfato;
- (3) temperaturas de 0 e 75°C, a depender da espécie de organismo metanogênico;
- (4) um mínimo de 0,5% de matéria orgânica biodisponível;
- (5) suficiente espaço intersticial para a bactéria metanogênica (~1um);
- (6) rápida deposição sedimentar.

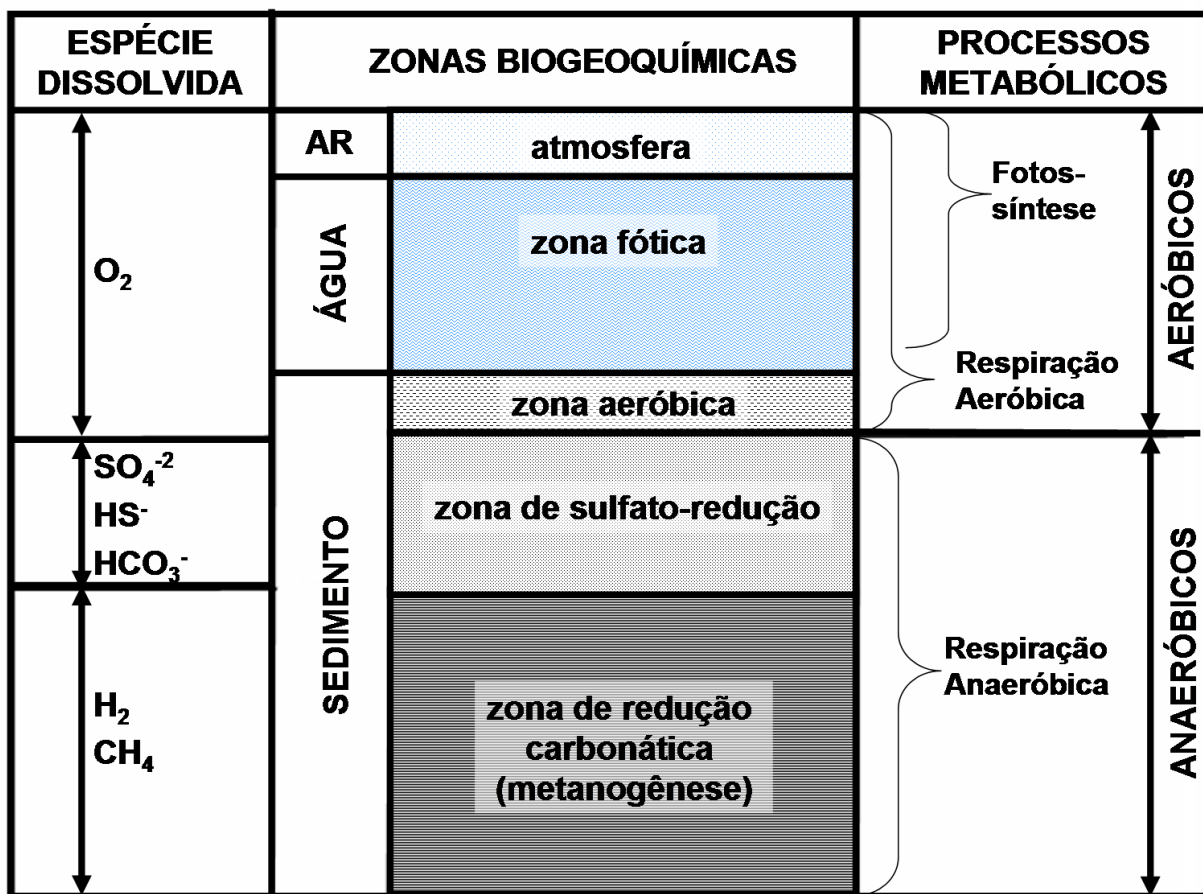


Figura 24 – Seção mostrando o ecossistema microbiano em diferentes camadas do sedimento (adaptado de Rice e Claypool, 1981).

Essas condições ambientais citadas são encontradas na maior parte dos sedimentos holocênicos da metade norte da Baía de Todos os Santos. Substratos ricos em hidrogênio e matéria orgânica biodisponível estão associados com sedimentos rasos e novos, que tipicamente contêm espaço intersticial suficiente para sustentar os organismos metanogênicos (Garcia-Garcia et al, 2007). De fato, segundo Dominguez et al., 2009, o início da sedimentação expressiva na BTS, que deu origem aos pacotes sedimentares em que o gás encontra-se atualmente armazenado, teve início recente na escala de tempo geológica, apenas por volta de 8000 anos AP. Segundo Lessa ET al, 2000, as taxas de sedimentação associadas à fácies lamosa em que o gás se encontra se situaram em torno de 0,8 – 4mm/ano para os últimos 5000 anos, número esse similar ao encontrado por Argolo (2001) (~1,5mm/ano). Além disso, teores de Carbono Orgânico superiores ao mínimo de 0,5% para sustentar a produção de metano em sedimentos de ambientes marinhos foram encontrados

em 23 dos 25 locais amostrados, incluindo todos os locais em que foi registrada ocorrência de gás. O teor de COT médio para os locais em que há ocorrências de gás foi 2,08%, enquanto para os locais sem gás, o valor médio foi de 0,97%.

As temperaturas no sedimento raso de uma baía tropical, naturalmente, situam-se dentro do intervalo proposto (0 – 75°C), e condições anóxicas são facilmente geradas a poucos centímetros do fundo marinho em regiões costeiras, ricas em matéria orgânica, como é o caso do interior da BTS. A zona de sulfato-redução é provavelmente rasa para a região, o testemunho da estação 8, que foi aberto em laboratório, apresentava um forte odor de H<sub>2</sub>S entre as profundidades de ~80 – 210 cm abaixo da interface sedimento/água. A amostra (N8), coletada pouco abaixo deste nível (240 cm), apresentou teores bastante elevados de metano.

Como foi dito, na zona de sulfato-redução, os hidrocarbonetos gasosos são consumidos por respiração anaeróbia bacteriana. O consumo de CH<sub>4</sub> ocorre a taxas muito maiores que o consumo daqueles gases de maior peso molecular, como etano, propano e butano (Whiticar,1999), explicando o fato de os teores de hidrocarbonetos mais pesados (C<sub>2</sub>+) encontrados neste trabalho não mostrarem algum padrão de variação com a profundidade, como o C<sub>1</sub> (aumento evidente de CH<sub>4</sub> com a profundidade). Assim, aquelas amostras (R8 e R9) que apresentaram o parâmetro de Bernard da ordem de 10<sup>2</sup> (tabela 2) possivelmente indicam a existência de uma zona de consumo de CH<sub>4</sub> atuando nas suas respectivas profundidades de coleta (0,7 e 1,5) nesse locais (estações 8 e 9, respectivamente).

#### **6.4 Zonas de acumulação de gás da BTS**

Acumulações de gás foram encontradas em abundância nos extremos noroeste e nordeste da BTS, e localizadamente na região centro-norte e do canal de Itaparica. Essas ocorrências foram divididas em zonas de acumulação Noroeste, Nordeste e Localizadas.

A sobreposição das áreas de acumulação de gás a da distribuição de sedimentos finos (Figura 25) revela uma coincidência espacial entre as ocorrências de gás e as regiões em que há predominância de lama no sedimento superficial de fundo. De fato, excetuando-se os limites leste e sul da zona ANW, acumulações de gás estão presentes em regiões que

apresentam teores de lama maiores que 50%, sendo predominantes em áreas com teores de lama acima de 90%. As médias dos teores encontrados na análise granulométrica das amostras R1 a R25 para locais com presença ou ausência de gás são mostradas na tabela 3. Mais uma vez é possível notar a boa correlação entre os teores de sedimentos finos com a presença de gás.

**Tabela 3 – Média dos teores de carbono orgânico total, carbonato, cascalho, areia, silte e lama para os locais com e sem a presença de gás.**

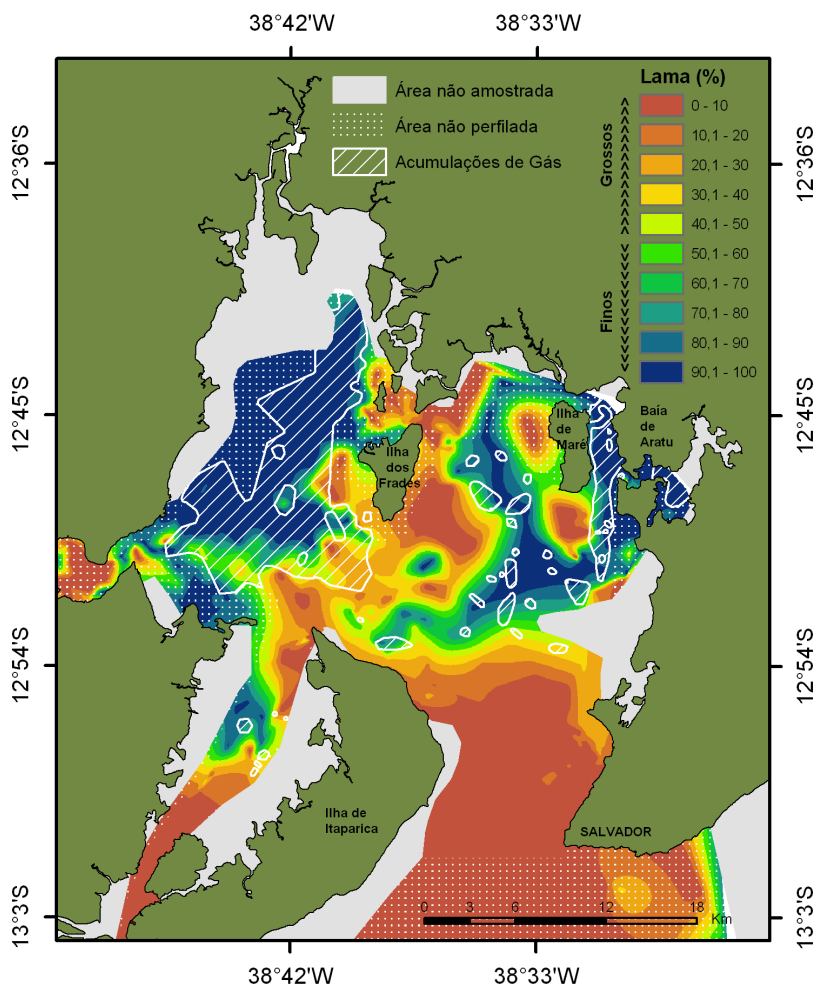
<b>Média (%)</b>	<b>COT</b>	<b>Carbonato</b>	<b>Cascalho</b>	<b>Areia</b>	<b>Silte</b>	<b>Argila</b>
<b>Locais com gás</b>	2,08	11,85	3,18	13,68	65,41	17,74
<b>Locais sem gás</b>	0,97	25,65	16,41	42,28	34,85	6,47

Os sedimentos finos que presentemente se acumulam na metade norte da BTS constituem um trato de sistemas de mar alto, relacionado à deposição atual (Dominguez et al., 2009). Estes sedimentos são os mais importantes para a geração de metano biogênico (Judd et al, 2002), pois se acumulam em águas rasas e ambientes costeiros, que são caracteristicamente ricos em matéria orgânica, devido à alta produtividade dessas áreas. No caso do trato de sistema de mar alto, existe um grande potencial para preservação da matéria orgânica, como consequência das altas taxas de deposição, favorecendo ainda a retenção do gás, por conta do aumento da pressão hidrostática devido à coluna d'água mais espessa. Desta forma os sedimentos lamosos presentes na baía de Todos os Santos são propícios para a geração e a acumulação de gás.

Não é possível, pelo método sísmico empregado, a confirmação da existência de acumulações de gás livre em profundidades além daquelas referentes às suas frentes, porém, é bem provável que essas se estendam desde a profundidade onde se encontram, até a do embasamento acústico.

As grandes diferenças na espessura sedimentar em diferentes regiões da BTS, evidentes no mapa de isópacas (Figura 12), podem ser entendidas observando-se o campo de correntes na BTS de meia maré vazante (Figura 2). Há uma grande equivalência entre regiões de maior velocidade de corrente de maré e zonas de menor espessura sedimentar na região ocorrência de sedimentos finos. As maiores velocidades são encontradas ao longo do transecto NW – centro – Canal de Salvador, enquanto as menores velocidades ocorrem

justamente na região N – NE. Dessa forma, uma deposição de sedimentos finos mais rápida é favorecida nesses locais de correntes mais fracas.



**Figura 25 - Mapa da distribuição de sedimentos finos na Baía de Todos os Santos, sobreposto às zonas de ocorrência de gás.**

A presença de frentes de gás planas em ANW e mais irregulares em ANE e AP, que apresentam plumas de gás intra-sedimentares, indicam uma maior capacidade selante do sedimento da região noroeste. As características das acumulações de gás no Noroeste da BTS podem ser relacionadas aos resultados encontrados por Mazumdar et al (2009). Esse autor relatou que, na costa oeste da Índia, semelhante ao que ocorre na BTS, as frentes de gás mais extensas são encontradas nos locais mais rasos (visto zona ANW). Isso seria resultado de uma menor coluna d'água, levando a uma menor pressão hidrostática no sedimento, diminuindo a solubilidade do gás. Conseqüentemente, haverá um maior teor de

gás livre em locais rasos, quando comparados com acumulações localizadas a maiores profundidades, como as zonas ANE e AP, mais profundas.

As áreas contendo acumulações de gás abrangem em sua totalidade 161Km<sup>2</sup>. Essa área corresponde a 15% da área total da BTS, ou 27% dos 600km<sup>2</sup> que foram imageados. Dessa forma, devido à possibilidade de existência de campos de gás nos locais não abrangidos durante o levantamento sísmico, essas acumulações provavelmente se estendem por uma área ainda maior, como as regiões do extremo norte e noroeste da BTS, além do canal do Paraguauçu e Baía de Iguape. Esses locais citados apresentam características sedimentológicas e geoquímicas semelhantes às aquelas encontradas nos locais em que acumulações de gás foram identificadas.

Apesar de apresentar sedimentos finos e altos teores de matéria orgânica, a zona FSG não apresenta ocorrências de gás nos perfis sísmicos. Assim, a ausência de gás livre nessa região poderia ser resultado de uma baixa capacidade selante dos sedimentos mistos lá encontrados, que permitiriam o escape desse para a coluna d'água. De fato, as ocorrências de gás circundantes (Zona AL) muitas vezes apresentam evidências de migrações e escapes de gás. Além disso, nessa zona as espessuras sedimentares são menores que aquelas encontradas nos locais de acumulações vizinhos. A ausência de gás poderia ser ainda o resultado de uma taxa de sedimentação (~ mesma taxa da zona ANW) mais lenta que o necessário para formação de gás em abundância, considerando-se os teores de carbono orgânico encontrados (< teores das ANW).

A zona ER pode ser considerada como uma extensão de SG, porém, devido ao espaço limitado e proximidade da coluna d'água, a gênese de gás não é favorecida, e, assim, o mesmo não é formado nem se acumula nesses locais. Segundo Dominguez et al., 2009, os locais que escaparam de um soterramento mais significativo na BTS, ou seja, aqueles correspondentes à zona ER, correspondem a terraços de abrasão que bordejam as ilhas da baía ou ocorrem em seu interior, testemunhas de ilhas pretéritas arrasadas pela ação de ondas.

Na zona GAI, mesmo que haja camadas de lama sob a areia, e que essas comportem acumulações de gás, não é possível sua identificação através do método sísmico empregado. De todo modo, a existência de acumulações de gás nesse substrato não é esperada, devido ao fato de sedimentos mais grosseiros não serem capazes de aprisionar o gás; de ser improvável a presença de sedimentos finos sob essa areia; e de esse tipo de

fração granulométrica ser usualmente pobre em matéria orgânica, como encontrado nas análises geoquímicas.

## 7 CONCLUSÕES

O presente trabalho possibilitou a identificação e mapeamento da distribuição espacial dos depósitos de gás presentes nos sedimentos holocênicos que preenchem a Baía de Todos os Santos.

As acumulações de gás identificadas ocupam praticamente toda a porção perfilada do noroeste e nordeste da BTS, ao passo que ocorrências localizadas foram encontradas no centro-norte da baía, bem como no canal de Itaparica. Dessa forma a BTS foi dividida espacialmente em zonas de ocorrência de gás, denominadas de ANW (noroeste), ANE (nordeste) e AL (localizadas).

As caracterizações sedimentológicas e geoquímicas dos sedimentos superficiais da BTS evidenciaram uma grande associação dos locais de ocorrência de gás com a presença de sedimentos finos e ricos em matéria orgânica. Adicionalmente, o gás foi encontrado naqueles locais que apresentam uma espessura sedimentar de no mínimo 5m, para as Acumulações de Noroeste (ANW), e 15m, para as Acumulações de Nordeste (ANE) e Localizadas (AL).

As diferentes zonas de ocorrência de gás, classificadas de acordo com a localização espacial, apresentam tipos distintos de acumulações entre si: em ANW há predominância de ocorrências extensas e praticamente ininterruptas e rasas (em média a 2,1m abaixo da interface sedimento-água), classificadas como cobertores acústicos; em ANE predominam as menos extensas, e de profundidades intermediárias (média de 5,7 abaixo do fundo marinho), cortinas acústicas. Em AL predominam ocorrências do tipo turbidez e colunas acústicas, devido à presença de menores teores de gás, sendo que as acumulações distribuem-se por uma ampla faixa de profundidades abaixo da interface sedimento-água, alcançando até ~30m (média de 11,3m abaixo do fundo do mar). Essas diferenças poderiam ser explicadas pela presença de teores variados de gás entre essas regiões, associados a características distintas dos sedimentos que armazenam e selam o gás, porém esses fatores devem ser ainda investigados.

Testemunhos coletados na zona ANW indicaram teores anômalos de metano (> 90 ppm), da ordem de até  $10^4$  ppm entre 1,3 e 2,4m abaixo do fundo marinho, confirmando que as anomalias acústicas encontradas nos perfis sísmicos eram causadas pela presença de



gás livre no sedimento. A determinação da razão isotópica  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  revelou uma forte depleção de  $^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ , indicando uma origem biogênica para esse gás.

Entretanto, várias questões necessitam ainda de ser respondidas. Recomenda-se, primeiramente, a realização de novas campanhas, visando uma ampliação da área de abrangência dos registros sísmicos e a expansão do mapeamento das ocorrências de gás nos sedimentos da BTS. O conhecimento da distribuição espacial das ocorrências de gás no sedimento da BTS, fornecido por este trabalho e por outros complementares que venham a ser feitos, possibilitam o planejamento de estudos mais específicos dessas ocorrências. Destacam-se dentre esses, estudos da identificação dos locais de escapes, para se estimar a contribuição desses acúmulos de gás para a atmosfera, e, conseqüentemente, para o efeito estufa; e estudos dos efeitos desses escapes de gás na biota.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abegg, F., Anderson, A.L.. The acoustic turbid layer in muddy sediments of Eckernfoerde Bay, Western Baltic: methane concentration, saturation and bubble characteristics. **Marine Geology**, 1997. 137:137-147.
- Anderson, A.L., Hampton, L.D.. Acoustics of gas-bearing sediments I. Background. **Journal of the Acoustic Society of America**, 1980. 67(6):1865-1888.
- Argolo, R.M., 2001. **Cronologias de sedimentação recente e de deposição de metais pesados na baía de Todos os Santos usando Pb<sup>210</sup> e Cs<sup>137</sup>**. Tese (Doutorado em Ciências - Geofísica). Universidade Federal da Bahia.
- Baraza, J., Ercilla, G. Gas-charged sediments and large pockmark-like features on the Gulf of Cadiz slope (SW Spain). **Marine and Petroleum Geology**, 1996. 13(2):253-261
- Blair, N.. The  $\delta^{13}C$  of biogenic methane in marine sediments: The influence of C(org) deposition rate, 1998. **Chemical Geology**, 152 (1-2), pp. 139-150.
- Boone, D.R. Whitman W.B., Rouviere P.. Diversity and taxonomy of methanogens. In: J.G Ferry, Editor, *Methanogenesis*, Chapman and Hall Co, New York (1993), pp. 35–80.
- Blott, S.J., Pye, K., 2001. Gradstat: a grain-size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes Landforms*. 26, 1237 – 1248.
- Blott, S.J., Pye, K.. Gradstat: a grain-size distribution and statistic package for the analysis of unconsolidated sediments. **Earth Surface Pocesess Landforms**, 2001. 26:1237-1248.
- Borowski, W.S., Paull, C.K., Ussier III, W.. Carbon cycling within the upper methanogenic zone of continental rise sediments: An example from the methane-rich sediments overlying the blake ridge gas hydrate deposits. **Marine Chemistry**, 1997. 57 (3-4), pp. 299-311
- Cirano, M., Lessa, G.C.. Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos, Brazil. **Revista brasileira de geofísica**, 2007. 25(4): 363 – 387.
- CRA – CENTRO DE RECURSOS AMBIENTAIS. 2000. Relatório de Diagnóstico da Qualidade das Águas da BTS. Consórcio Hydros CH2M Hill. CRA. Governo do Estado da Bahia.

- CRA - CENTRO DE RECURSOS AMBIENTAIS. 2005. Relatório Técnico, Diagnóstico da Concentração de Metais Pesados e Hidrocarbonetos de Petróleo nos Sedimentos e Biota da Baía de Todos os Santos. Consórcio Hydros CH2M Hill. CRA. Governo do Estado da Bahia.
- Davis ,A. Shallow gas: an overview. **Continental Shelf Research**, 1992. 12:175
- Diez, R., García-Gil, S., Duran, R., Vilas,F.. Gas accumulations and their association with particle size distribution patterns in the Ría de Arousa seabed (Galicia, NW Spain): an application of the discriminant analysis. **Geo-Marine Letters**, 2007. 89-102.
- Dimitrov, L.. Contribution to atmospheric methane by natural seepages on the Bulgarian continental shelf. **Continental Shelf Research**, 2002. 22:2429-2442.
- Dominguez, J.M.L, Bittencourt, A.C.S.P., 2009. Geologia . In Hatje, V.; Andrade, J.B. Baía de Todos os Santos – Aspectos oceanográficos. Salvador: EdUFBa
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 1997. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2ª ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos (CNPq), 211p.
- Emeis, K.-C., Brüchert, V., Currie, B., Ender, R., Ferdelman, T., Kiessling, A., Leipe, T., Noli-Peard, K., Struck, U., Vogt, T.. **Continental Shelf Research**, 2004. 24:627-642.
- Fleischer, P., Orsi, T.H., Richardson, M.D., Anderson, A.L.. Distribution of free gas in marine sediments: a global overview. **Geo-Marine Letters**, 2001. 21:103-122.
- Frazão, E., Vital, H. Estruturas rasas de gás em sedimentos no estuário Potengi (Nordeste do Brasil). **Revista Brasileira de Geofísica**. 2007. 25:17-26.
- García-García, A., Orange, D.L. Miserocchi, S. Correggiari, A. Langone, L. Lorenson, T.D. Trincardi F., Nittrouer, C.A., What controls the distribution of shallow gas in the Western Adriatic Sea?. **Continental Shelf Research** 27, 2007. pp. 359–374.
- Garcia-Gil, S., Vilas, F., Garcia-Garcia,A.. Shallow gas features in incised-valley fills (Ría de Vigo, NW Spain): a case study. **Continental Shelf Research**, 2002. 22:2303-2315.
- Goody, D. C. and Darling, W. G.. The potential for methane emissions from groundwaters of the UK. **Science of the Total Environment** 339, 2005. 117–126.

- Hampton, M.A, Karl, H.A., Murray, C.J. Acoustic profiles and images of the Palos Verdes margin: implications concerning deposition from the White's Point outfall. **Continental Shelf Research**, 2002 22:841-857.
- Iglesias, J., García-Gil, S.. High-resolution mapping of shallow gas accumulations and gás seeps in San Simón Bay (Ría de Vigo, NW Spain). Some quantitative data. **Geo-Marine Letters**, 2007. 27:103-114.
- Judd, A., Davies, G., Wilson, J., Holmes, R., Baron, G., Bryden, I.. Contributions to atmospheric methane by natural seepages on the UK continental Shelf. **Marine Geology**, 1997. 137:165-189.
- Judd, A.G., Sim, R., Kingston, P., McNally, J.. Gas seepage on an intertidal site: Torry Bay, Firth of Forth, Scotland. **Continental Shelf Research**, 2002. 22:2317-2331.
- Judd, A.G.. Natural seabed gas seeps as sources of atmospheric methane. **Environmental Geology**, 2004. 46:988-996.
- Kitidis, V., Tizzard, L., Uher, G., Judd, A., Upstill-Goddard, R.C., Head, I.M., Gray, N.D., Taylor, G., Durán, R., Diez, R., Igesias, J., García-Gil, S.. The biogeochemical cycling of methane in Ría de Vigo, NW Spain: Sediment processing and sea-air exchange. **Journal of Marine Systems**, 2007. 66:258-271.
- Krabbenhoeft, A., Netzeband, G.L., Bialas, J., Papenberg, C.. Episodic methane concentrations at seep sites on the upper slope Opouawe Bank, southern Hikurangi Margin, New Zealand. **Marine Geology**, 2010. 272 (1-4), pp. 71-78.
- Lessa, G., Dias, K.. Distribuição espacial das litofácies de fundo da Baía de Todos os Santos. **Quaternary and Environmental Geosciences**. 2009 01(2):84-97.
- Lessa, G.C, Dominguez, J.M.L., Bittencourt, A.C.S.P. e Brichta, A. Tides and Tidal Circulation of Todos os Santos Bay: a general characterization. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 2001. 73(2):245-261
- Lessa, G.C., Bittencourt, A.C.S.P., Brichta, A., Dominguez, J.M.L. A Reevaluation of the Late Quaternary Sedimentation in Todos os Santos Bay (BA), Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 2000. 72(4):573-590.

- Lessa, G.C., Cirano, M., Genz, F., Tanajura, C.A.S, Silva, R.R., 2009. Oceanografia Física. In Hatje, V.; Andrade, J.B. Baía de Todos os Santos – Aspectos oceanográficos. Salvador: EdUFBa.
- Lin, C.M., Li, Y.L., Zhuo, H.C., X. Zhang, Shurr, G.W., Ridgley J.L., Zhang, Z.P., Xue, T.. Features and sealing mechanism of shallow biogenic gas in incised valley fills (the Qiantang River, eastern China): A case study. **Marine and Petroleum Geology**, 2010. 27:909-922.
- Linke, P., Sommer, S., Rovelli, L., McGinnis, D.F.. Physical limitations of dissolved methane fluxes: The role of bottom-boundary layer processes. **Marine Geology**, 2010.272 (1-4), pp. 09-222.
- Lorenson, T.D., Claypool, G.E., Dougherty, J.A.. Natural gas geochemistry of sediments drilled on the 2005 Gulf of Mexico JIP cruise. **Marine and Petroleum Geology**, 2008. 25 (9), pp. 873-883.
- Mazumdar, A., Peketi, A., Dewangan, P., Badesab, F., Ramprasad, T., Ramana, M.V.. Shallow gas charged sediments off the Indian west coast: Genesis and distribution. **Marine Geology**, 2009. 267:71-85.
- Okyar, M., Ediger, V.. Seismic evidence of shallow gas in the sediment on the shelf off Trabzon, southeastern Black Sea. **Continental Shelf Research**, 1999. 19:575-587.
- Prior, D. B., J. M. Coleman, 1984. Submarine Slope Instability, in *Slope Instability*, D. Brunnsden and D. B. Prior, pp. 419–455, John Wiley, New York
- Rice, D.D., Claypool, G.E.. Generation, accumulation, and resource potential of biogenic gas. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, 1981. 65 (1), pp. 5-25.
- Santos Neto, E.V.. Geoquímica de gases: uma nova tecnologia em avaliação de sistemas petrolíferos, *in* B. Geoci, Petrobras, Rio de Janeiro, v.12, no. 2, p. 357-383, May/Nov. 2004.
- Whiticar, M. J.. Correlation of natural gases with their sources. In: Magoon, L. B.; DOW, W. G. (Ed.) *The petroleum system-from source to trap*. Tulsa, Okla.: American Association of Petroleum Geologists, 1994. cap. 16, p. 261-283. (American Association of Petroleum Geologists. Memoir, 60).

- Whiticar, M.J.. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. **Chemical Geology**, 1999. 161 (1), pp. 291-314.
- Wilkins, R.H., Richardson, M.D.. The influence of gas bubbles on sediment acoustic properties: in situ, laboratory, and theoretical results from Eckernförde Bay, Baltic sea. **Continental Shelf Research**, 1998. 18:1859-1892.
- Wolgemuth, K.; Burnett, W.; Moura, P. L. Oceanography and suspended materials in Todos os Santos Bay. **Revista Brasileira de Geociências**. 1981. 11:172-178.
- Yamamoto, S., Alcauskas, J.B., Crozier, T.E.. Solubility of methane in distilled water and seawater. **Journal of Chemical and Engineering Data**, 1976. 21:78-80.
- Yun, J.W., Orange, D.L., Field, M.E Subsurface gas offshore of northern California and its link to submarine geomorphology. **Marine Geology**, 1999. 154 (1-4), pp. 357-368.