

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**CARACTERIZAÇÃO DE OCORRÊNCIAS DE GÁS RASO NA PLATAFORMA
CONTINENTAL INTERNA DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL**

NATACHA DE OLIVEIRA

ORIENTADOR – Prof. Dr. Jair Weschenfelder

Volume I

Porto Alegre – 2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**CARACTERIZAÇÃO DE OCORRÊNCIAS DE GÁS RASO NA PLATAFORMA
CONTINENTAL INTERNA DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL**

NATACHA DE OLIVEIRA

ORIENTADOR – Prof. Dr. Jair Weschenfelder

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Iran Carlos Stalliviere Corrêa - UFRGS

Prof. Dr. Jorge Luiz Barbosa da Silva - UFRGS

Prof. Dr. Luiz Antônio Pereira de Souza - IPT

Dissertação de Mestrado apresentada
como requisito parcial para obtenção
do título de Mestre em Geociências.

Porto Alegre – 2017

CIP - Catalogação na Publicação

de Oliveira, Natacha
CARACTERIZAÇÃO DE OCORRÊNCIAS DE GÁS RASO NA
PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DO RIO GRANDE DO SUL,
BRASIL / Natacha de Oliveira. -- 2017.
71 f.

Orientador: Jair Weschenfelder.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências,
Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto
Alegre, BR-RS, 2017.

1. Levantamentos sísmicos. 2. Plataforma interna.
3. Acumulações de gás. 4. Camada sedimentar. 5.
Evolução costeira. I. Weschenfelder, Jair, orient.
II. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, professor Jair Weschenfelder, pela orientação em todo processo que envolveu esse mestrado, por todo aprendizado, confiança, incentivo e ideias compartilhadas.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande, em especial ao professor Gilberto Griep, pela confiança em mim no compartilhamento dos dados sísmicos da plataforma, bem como pelas ideias e dúvidas tiradas no início do processo desta dissertação. Sem ele este trabalho não seria possível e minha paixão pela geofísica aplicada ao fundo do mar talvez não fosse tanta.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao Instituto de Geociências e ao Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica pelo espaço e estrutura concedidos. Sou grata a Capes e ao projeto Ciências do Mar II, pela bolsa de estudos.

Agradeço aos pesquisadores que compõem a banca, os quais aceitaram avaliar meu trabalho e assim contribuir com ele.

Gratidão a todos os amigos e colegas que o CECO me presenteou e com os quais tive o prazer de conviver e de aprender muito nesses dois anos de caminhada, em especial, ao Mauro, Giu, Ana, Fernando, Camila, Inaiê e Chico.

Às amigas que me acompanham há muito tempo mesmo de longe, Mari, Bruna, Gabi, Bianca, Nick e Débora. A meu grande amigo, Marcelo.

Agradeço a toda a minha família pelo apoio incondicional. À minha mãe, em especial, por cada palavra de apoio e sabedoria, cada momento de paciência comigo e por acreditar em mim de um jeito só dela.

RESUMO

Através de perfis sísmicos de alta resolução (3,5 kHz), coletados entre os anos de 2009 e 2014, foi possível analisar o fundo e sub-fundo marinho da plataforma continental interna do Rio Grande Sul, mais especificamente em frente à desembocadura do estuário da Lagoa dos Patos. Estes dados permitiram observar anomalias acústicas caracterizadas como sendo uma resposta à presença de gás intersticial no sedimento. As acumulações foram identificadas com base na morfologia, dimensão, tipo de assinatura acústica e concentração aparente de gás. Assim, cinco formas distintas de gás raso foram reconhecidas: cortina de gás, *blanking* acústico, turbidez acústica, pináculo de turbidez e pluma intra-sedimentar. Tais estruturas se apresentaram isoladas ou então relacionadas umas com as outras. Dentre estas, as cortinas de gás e *blanking* acústico foram as que ocorreram em maior número e área. As cortinas apresentaram morfologia bem definida, em formato de caixa, onde o gás se encontra mais concentrado. O *blanking* acústico, formado pela presença de bolhas de gás bem disseminadas no sedimento, foi distinguido por uma forte reflexão de topo e um mascaramento dos refletores subjacentes, sem demonstrar limites laterais bem definidos. A turbidez acústica, associada à disseminação de gás moderada a alta, é uma perturbação de sinal pela presença de bolhas no sedimento em quantidades que apenas atenuam a energia sísmica, possibilitando identificar algum refletor abaixo do seu topo. Os pináculos de turbidez encontrados são pequenos e apresentaram forma pontiaguda, indicando uma disseminação de gás baixa a moderada. A pluma intra-sedimentar encontrada apresentou formato quase parabólico, interpassando a camada de sedimentos de modo que o gás presente nela é baixo a moderadamente disseminado. Tais formas estão diretamente ligadas com a distribuição das fácies sedimentares, as quais agem como reservatório e selante, retendo ou não o gás e gerando as diferentes respostas acústicas. A ocorrência do gás está concentrada em frente à desembocadura da Lagoa dos Patos, local de deposição de sedimentos finos e matéria orgânica. Este aporte lagunar e o retrabalhamento da plataforma por eventos de regressão e transgressão marinha no Quaternário permitiram a gênese e preservação do gás em sedimentos holocênicos, de provável origem biogênica.

Palavras-chave: Levantamentos sísmicos, Acumulações de gás, Evolução costeira.

ABSTRACT

Using high-resolution (3.5 kHz) seismic profiles collected between 2009 and 2014, it was possible to analyze the bottom and sub-bottom geoacoustics characteristics of the inner continental shelf of the Rio Grande Sul, more specifically in front of the mouth of the estuary of the Patos Lagoon. The data allowed observing acoustic anomalies characterized like being a response to gas presence in the sediment. The gas accumulations were identified based on their morphology, dimension, type of acoustic signature and apparent concentration of gas. Thus, five different features of shallow gas were recognized: gas curtain, acoustic blanking, acoustic turbidity zone, turbidity pinnacle and intra-sedimentary plume. These structures have been isolated or then related each other. Among these, the gas curtain and acoustic blanking were those that occurred in greater number and area. Gas curtains presented well defined morphology, in gas boxes format, where the gas is more concentrated. Acoustic blanking, originated from presence of well disseminated gas bubbles in the sediment, was distinguished by a strong top reflection that masks the below reflectors, without to show well defined lateral limits. Acoustic turbidity zone, associated with the dissemination of moderate to high gas, is a signal disturbance due to the presence of bubbles in the sediment in quantities that only attenuate the seismic energy, allowing yet identifying some reflector below its top. Turbidity pinnacles found are small and present pointed shape, indicating to a low to moderated gas dissemination. Intra-sedimentary plume found presented an almost parabolic shape, penetrating across the sediment layer thus the gas dissemination in the plume is low to moderate. These forms are linked directly with the sedimentary facies distribution, which act like reservoir and sealant, retaining or not the gas and producing the distinct acoustic response. The gas is concentrated in front of the mouth of Patos Lagoon, deposition site of fine sediments and organic matter. Such lagoon sediment input and the reworking of the shelf by marine regression and transgression events during Quaternary allowed the genesis and preservation of gas occurring in the Holocene sediments, which origin is probable biogenic.

Keywords: Seismic surveys, Gas accumulations, Coastal evolution

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1. Plataforma continental do Rio Grande do Sul, onde se situa a área estudada, demarcada pelo retângulo vermelho.....11
- Figura 2. Fisiografia e principais estruturas geológicas do embasamento e da Bacia de Pelotas (modificado de Urien & Martins, 1978, *apud* Dillenburg, 1988).....12
- Figura 3. Seção geológica da bacia de Pelotas (modificado de Villwock, 1984).....13
- Figura 4. Representação da geomorfologia da Província Costeira do Rio Grande do Sul (modificado de Villwock, 1984).....14
- Figura 5. Perfil transversal dos sistemas deposicionais da Planície Costeira do Rio Grande do Sul com suas fácies sedimentares associadas. As barreiras estão correlacionadas com os picos da curva isotópica de oxigênio de Imbrie *et al.* (1984). (Modificado de Tomazelli & Villwock, 2005).....15
- Figura 6. Representação da aquisição sísmica em um ambiente marinho (modificado de Ayres Neto, 2000).....22
- Figura 7. Linhas sísmicas coletadas sobre a área estudada.....23

SUMÁRIO

Sobre a estrutura desta Dissertação de Mestrado.....	6
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....	7
1. O estudo de gás raso em sedimentos no contexto global.....	8
2. Objetivos.....	10
3. Área de estudo.....	11
3.1. Elementos Geológicos e Geomorfológicos da Província Costeira do Rio Grande do Sul.....	11
3.2. Planície costeira do Rio Grande do Sul e seus sistemas deposicionais..	14
3.3. Lagoa dos Patos.....	16
3.4. Plataforma Continental do Rio Grande do Sul.....	18
3.5. Quadro Oceanográfico e Climatológico da plataforma continental.....	19
3.5.1. Caracterização Hidrodinâmica.....	20
3.5.2. Caracterização Climatológica.....	21
4. Materiais e métodos	21
4.1. A sísmica de reflexão.....	21
4.2. Aquisição e processamento dos dados sísmicos	23
4.3. Análise dos dados sísmicos	24
Referências bibliográficas	26
CAPÍTULO II – GÁS RASO NA PLATAFORMA CONTINENTAL DO RIO GRANDE DO SUL, SUL DO BRASIL - SHALLOW GAS ON THE RIO GRANDE DO SUL CONTINENTAL SHELF, SOUTHERN BRAZIL (Artigo submetido à Revista Pesquisas em Geociências).....	35
CAPÍTULO III – CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	59

ANEXO I Atestado de Submissão do artigo para a Revista Pesquisas em Geociências	63
ANEXO II Resumo apresentado no XV Congresso Brasileiro da Associação de Estudos do Quaternário 2015.....	64
ANEXO III Resumo apresentado na 1ª Semana Acadêmica dos Pós-Graduandos do Instituto de Geociências da UFRGS 2015.....	67

Sobre a estrutura desta Dissertação de Mestrado:

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno de artigo científico submetido à publicação em periódicos ou publicações equivalentes. Conseqüentemente, sua organização compreende as seguintes partes principais, conforme Norma 03 do Programa de Pós Graduação em Geociências, da UFRGS.

Capítulo I – Introdução – Apresentação sobre o tema e descrição do objeto de estudo do mestrado, onde estão sumarizados os objetivos e a filosofia de pesquisa desenvolvida, o estado da arte sobre o tema, caracterização da área onde o estudo foi realizado, bem como descrição dos materiais e métodos utilizados. Por fim, um breve detalhamento sobre a ocorrência de gás no sedimento marinho e costeiros e as formas em que se manifesta.

Capítulo II – Artigo submetido – Apresenta o artigo “GÁS RASO NA PLATAFORMA CONTINENTAL DO RIO GRANDE DO SUL, SUL DO BRASIL - SHALLOW GAS ON THE RIO GRANDE DO SUL CONTINENTAL SHELF, SOUTHERN BRAZIL” submetido ao periódico *Revista Pesquisas em Geociências*.

Capítulo III – Considerações Finais e Conclusões – Composta pela síntese dos resultados e conclusões do trabalho.

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1. O ESTUDO DO GÁS RASO EM SEDIMENTOS NO CONTEXTO GLOBAL

As acumulações de gás raso em sedimentos costeiros têm sido cada vez mais estudadas, revelando ser uma ocorrência comum nos mais variados ambientes antigos e recentes. Os ambientes sedimentares de deltas (Figueiredo *et al.*, 1996; Félix & Mahiques, 2013), lagoas costeiras (Cukur *et al.*, 2013; Weschenfelder *et al.*, 2006; 2016; Klein *et al.*, 2016), baías (Schubel & Schiemer, 1972; Park *et al.*, 1995), rias (García-Gil *et al.*, 1999; 2002; Durán *et al.*, 2007), estuários (Martens *et al.*, 1998; Pinet *et al.*, 2008), baías (Aliotta *et al.*, 2014; Klein *et al.*, 2016) e plataformas continentais (Okyar & Ediger, 1999; Tóth *et al.*, 2014; Oliveira & Weschenfelder, 2015) são exemplos da abrangência das ocorrências de gás e também representam evidências da relação e origem do sedimento gasoso com os processos de evolução costeira.

A relevância do estudo de gás nos sedimentos marinhos reside na influência e impacto que a sua presença exerce sobre todo ambiente circundante. Através dos efeitos significativos no comportamento físico e características geoacústicas das camadas sedimentares, como o aumento do volume do sedimento pela presença de espaços preenchidos com gás (Hill *et al.*, 1992), pode haver instabilidade do fundo gerando consequências adversas para os projetos de engenharia, como exploração de recursos, dragagem e construção de dutos (Hagen & Vogt, 1999).

Ainda, a presença de gás pode modificar feições geológicas no fundo e sub-fundo marinho, como também a composição química dos oceanos e os processos biológicos (Judd & Hovland, 2007). Davis (1992) expõe que escapes de gás e óleo aparentam inibir o desenvolvimento normal das comunidades bentônicas ou em outros casos podem enriquecer a epifauna. Além disso, o gás raso é de fácil acesso, significativamente difundido e subaproveitado, assim, levando em conta a crescente demanda mundial de energia, pode ser um importante recurso energético no futuro (Cukur *et al.*, 2013).

Somado a isto, estudos sobre o aquecimento global têm incentivado pesquisas mais aprofundadas sobre o gás, já que avaliações mais recentes revelaram que as águas marinhas rasas contribuem significativamente para o metano atmosférico (Hovland *et al.*, 1993), o contrário do que se imaginava anteriormente. Logo, sua liberação também representa a entrada de gases de efeito estufa no sistema oceânico-atmosférico. Além disso, este pode ajudar a decifrar as

mudanças paleoclimáticas e entender as modificações do futuro uma vez que influencia no balanço de carbono (Anka *et al.*, 2012).

Dentre os gases presentes nos sedimentos de ambientes marinhos o metano é o mais abundante (Claypool & Kvelvolden 1983; Dondurur *et al.*, 2011). Este gás pode ser gerado tanto por processos biogênicos quanto por processos termogênicos. O gás biogênico é o produto final da decomposição da matéria orgânica por bactérias metanogênicas, as *Archeobacterias*, em um ambiente anóxico. Este processo começa logo após a matéria orgânica ser depositada, ocorrendo principalmente em profundidades rasas, nos quais os níveis de sulfato foram empobrecidos pelas atividades de bactérias redutoras de sulfato (Judd *et al.*, 2002). As bactérias metanogênicas são incapazes de competir com as redutoras de sulfato por substratos e por isso suas atividades são limitadas às profundidades do sedimento abaixo do qual ocorre depleção de sulfato (Albert *et al.*, 1998).

O gás termogênico, por sua vez, é produzido através do craqueamento de compostos orgânicos a altas temperaturas e pressão a uma profundidade que excede 1000 m (Floodgate & Judd, 1992; Cukur *et al.*, 2013). Dependendo da natureza do material orgânico e profundidade de soterramento vários compostos de hidrocarbonetos podem ser formados, como asfalto natural, petróleo bruto e gás natural (Judd, 2003). Este gás é instável gravitacionalmente e tende a migrar até profundidades mais rasas na coluna sedimentar através de camadas de rocha ou sedimentos permeáveis e falhas (Anderson & Bryant, 1990).

Uma vez formado, o gás pode estar em solução entre os poros no sedimento ou em forma livre. A sua solubilidade é dependente de fatores físicos tais como temperatura, salinidade, pressão parcial do metano (Hagen & Vogt, 1999) e pressão hidrostática. Quando a solubilidade do metano é excedida pela sua concentração, os poros de água intra-sedimentares podem tornar-se supersaturados em gás, formando gás livre, ou seja, bolhas. Estas bolhas são flutuantes e tendem a migrar verticalmente, no entanto podem permanecer aprisionadas e formar reservatórios. A acumulação e mobilidade das bolhas de gás livre nos sedimentos marinhos são determinadas pela porosidade dos sedimentos do reservatório e a permeabilidade da camada selante, sendo esta geralmente composta de sedimentos finos em que os espaços vazios são pequenos e não permitem que o fluido flua, gerando uma vedação impermeável (Diez *et al.*, 2007).

A presença do gás metano intersticial nos sedimentos pode assumir formas que são detectáveis aos perfiladores sísmicos. Isso ocorre pois as bolha de gás são

fortes dispersores de energia acústica uma vez que ocorre uma grande diferença de impedância acústica entre o gás livre e água do mar. Deste modo, levam à uma redução compressional na velocidade das ondas acústicas emitidas, aumentam a atenuação compressional da onda e aumentam o espalhamento sonoro (Wilkens & Richardson, 1998). Assim, os sedimentos gasosos são identificados nos perfis sísmicos como zonas mais ou menos contínuas acusticamente turvas (sombras escuras) que mascaram todas as reflexões existentes (Judd & Hovland, 1992). As diferentes formas em que as acumulações gasosas podem ser caracterizadas são dependentes da disposição do gás no interior dos poros do sedimento e do quão permeável é a camada sedimentar acima do horizonte de gás, para preservá-lo (aprisioná-lo) ou não.

Na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul (RS), estudos com uso de sísmica de reflexão em águas rasas são escassos até o momento. Logo, a presença de gás na área, quando estudada em trabalhos pretéritos, não foi detalhada de modo aprofundado. Assim, com intuito de melhor compreender a presença do gás e contribuir com estudos de evolução geológica da planície costeira do RS e da plataforma adjacente, este estudo descreve e discute as feições de gás presentes, localização e abrangência das mesmas.

2. OBJETIVOS

Este estudo tem como principal objetivo apresentar, através de sísmica de reflexão de alta resolução (3,5 kHz), as diferentes formas de gás raso presentes na plataforma continental do Rio Grande do Sul, mais precisamente nas proximidades da desembocadura da Lagoa dos Patos. Neste contexto, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Descrição das formas de acumulação de gás em relação a sua morfologia, dimensão e assinatura sísmica;
- Mapeamento dos locais de gás na região estudada da plataforma;
- Determinação da possível origem do gás associado aos paleoambientes deposicionais e evolução geológica da plataforma.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área estudada neste trabalho encontra-se na porção sul da plataforma continental interna do Rio Grande do Sul, delimitada entre os paralelos $32^{\circ}00'S$ e $32^{\circ}35'S$ e isóbatas de 5 m a 45 m aproximadamente (Fig. 1). Uma caracterização geológica, geomorfológica, hidrográfica e meteorológica é apresentada a seguir.

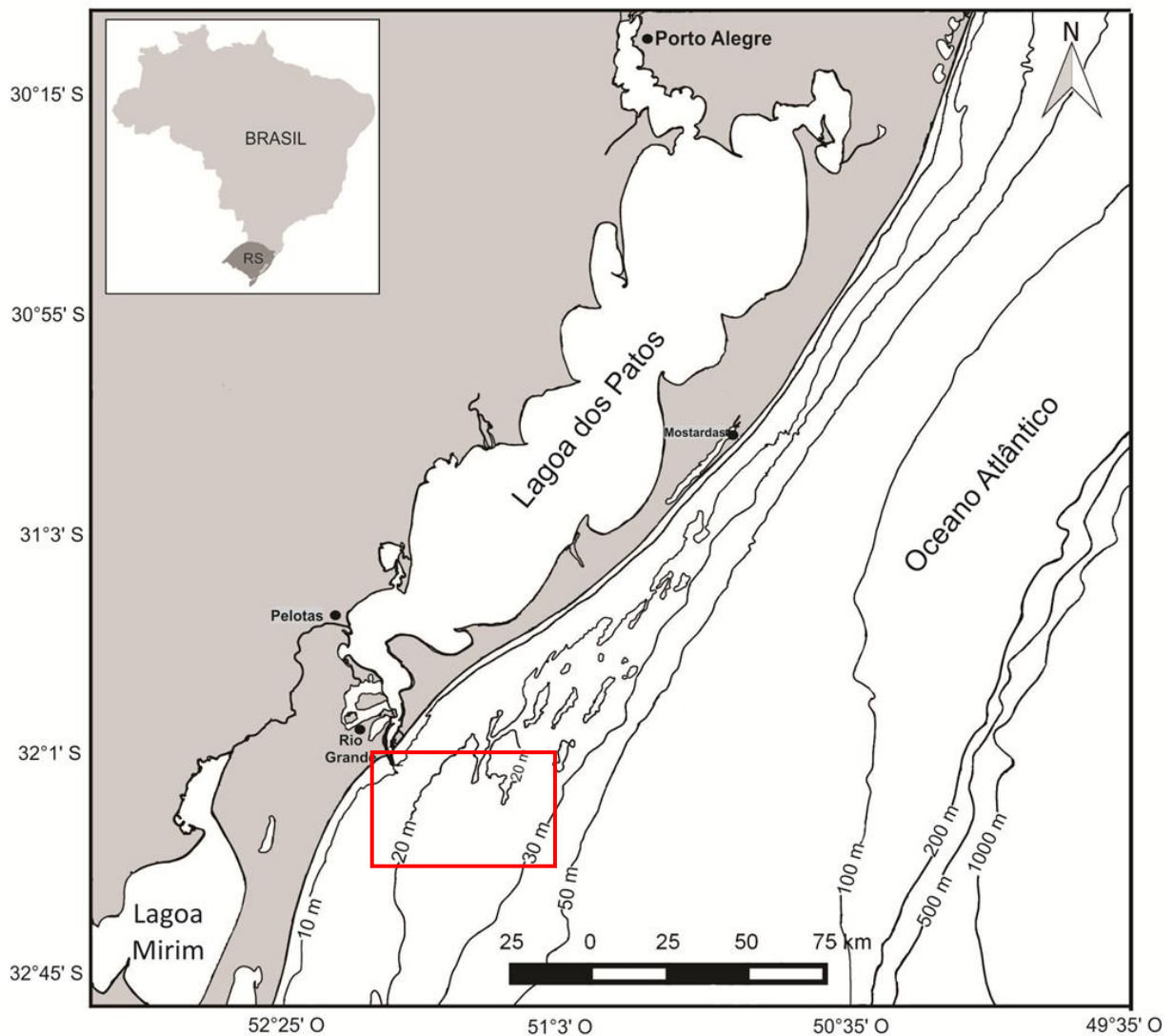


Figura 1. Plataforma continental do Rio Grande do Sul, onde se situa a área estudada, demarcada pelo retângulo vermelho.

3.1. Elementos Geológicos e Geomorfológicos da Província Costeira do Rio Grande do Sul

A Província Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) tem sua origem atribuída aos eventos geotectônicos iniciados no Jurássico e que levaram à ruptura do supercontinente Gondwana e à consequente abertura do Oceano Atlântico Sul

(Villwock & Tomazelli, 1995). Esta região abrange a plataforma continental, planície costeira e embasamento adjacente, sendo composta por um grupo de elementos geológicos (tectônico, estrutural, sedimentar e morfológico) característico da margem continental brasileira (Villwock, 1972).

Dentre os elementos geológicos da PCRS, destacam-se o embasamento e a bacia de Pelotas (Villwock, 1984) (Fig. 2). O embasamento é composto pelo complexo cristalino pré-cambriano que constitui o Escudo Sul Rio Grandense e sequências sedimentares e vulcânicas, paleozoicas e mesozoicas, da Bacia do Paraná (Villwock, 1972). A partir do embasamento tem-se a Bacia de Pelotas, uma bacia marginal subsidente preenchida por sequências clásticas continentais e transicionais (Asmus & Porto, 1972), depositadas entre o Cretáceo Inferior e o Mioceno (Fontana, 1990).

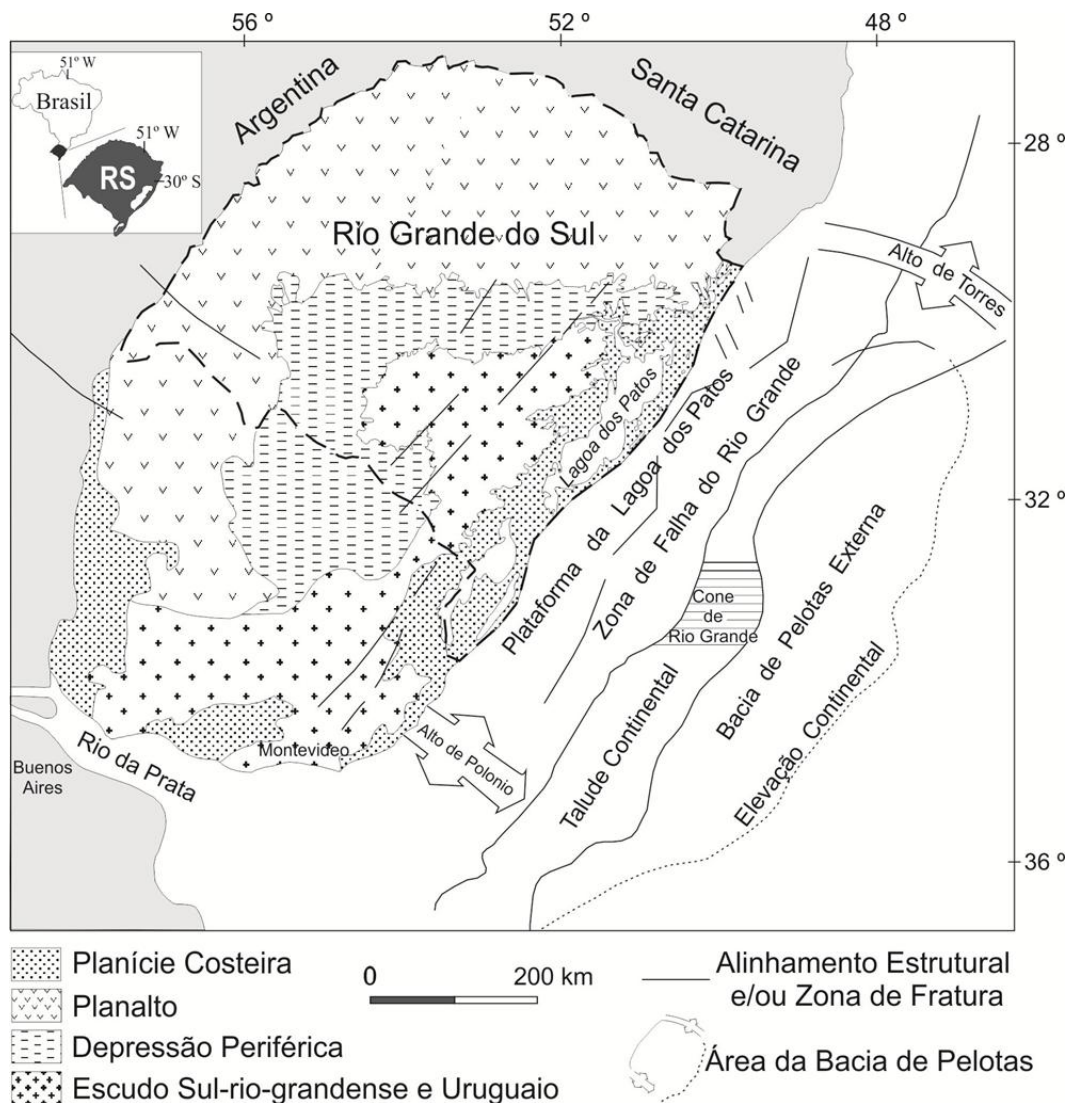


Figura 2. Fisiografia e principais estruturas geológicas do embasamento e da Bacia de Pelotas (modificado de Urien & Martins, 1978, *apud* Dillenburg, 1988).

Dentro do conjunto de bacias da margem continental brasileira, esta é a mais meridional, estando limitada ao norte pelo Alto de Florianópolis e ao sul pelo Alto Polônio no território uruguaio. A espessura sedimentar sobre o embasamento da bacia é variável, podendo ultrapassar 10 km (Fontana, 1989) (Fig. 3). A porção holocênica da Bacia é representada por um sistema de barreira costeira de 1.000 km de extensão, que é segmentado por muito poucas entradas e pequenos rios que atualmente trazem pouco sedimento para a costa (Barboza *et al.*, 2011).

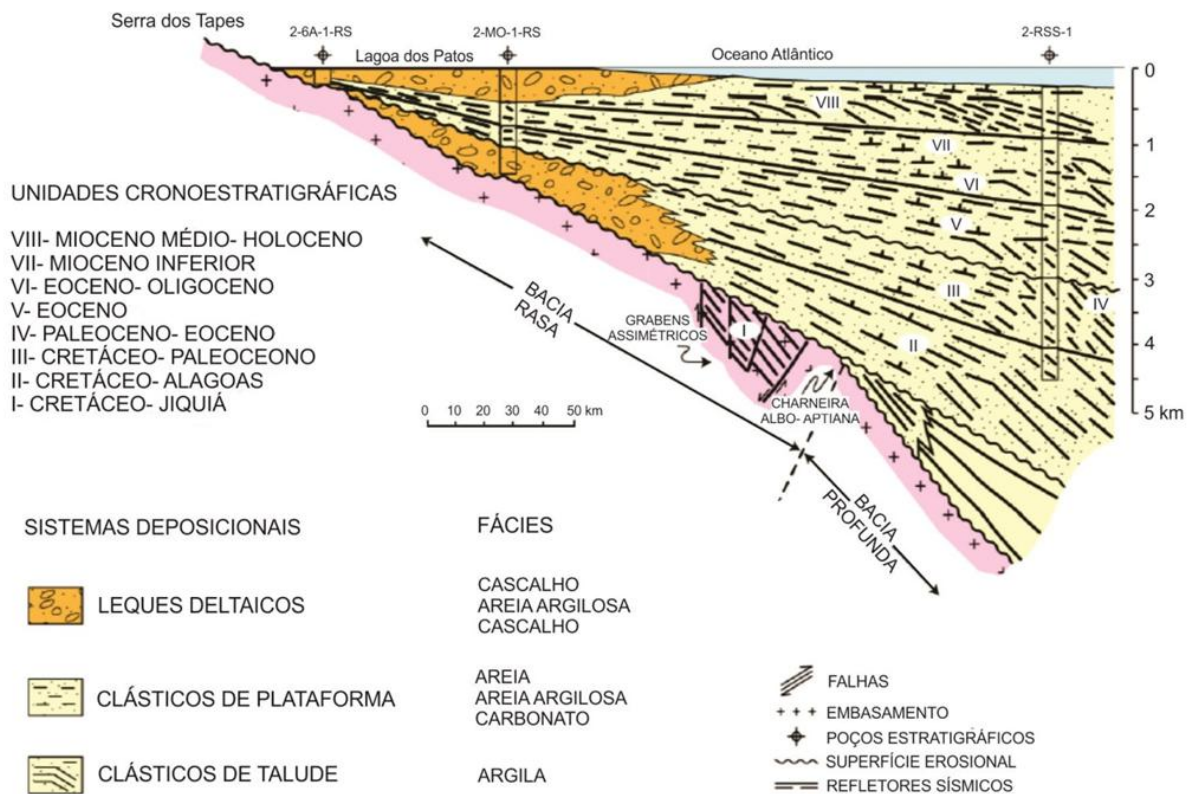


Figura 3. Seção geológica da bacia de Pelotas (modificado de Villwock, 1984).

Do modo geral, a PCRS evoluiu a partir da progradação de sedimentos terrígenos, depositados em sistemas de leques aluviais, retrabalhados nas suas porções distais por, no mínimo, quatro ciclos trans-regressivos sucessivos ocorridos durante os últimos 500 mil anos (Villwock, 1984; Villwock & Tomazelli, 1995).

A região, do ponto de vista estrutural geológico, pode ser dividida em dois setores: terras altas e terras baixas (Villwock & Tomazelli, 1995) (Fig. 4). O primeiro compreende o Planalto Sul Rio-Grandense, a Depressão Central e o Planalto das Araucárias. O segundo engloba a planície costeira e plataforma continental adjacente. As terras altas fornecem sedimentos clásticos terrígenos para as terras

baixas onde, sob a ação de uma série de processos dinâmicos e sedimentares costeiros ali atuantes, acumulam-se em diversos ambientes transicionais e marinhos (Villwock & Tomazelli, 1995).

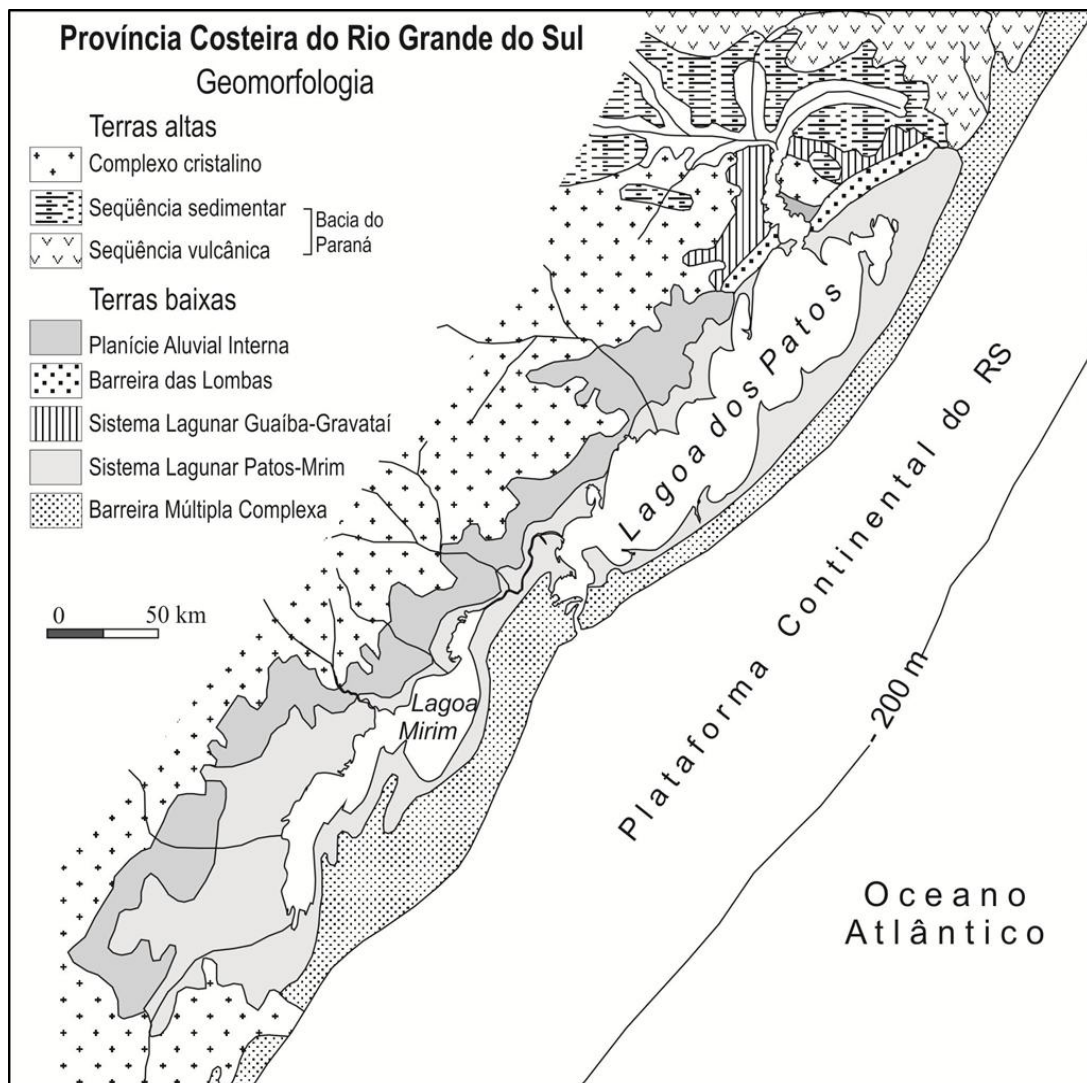


Figura 4. Representação da geomorfologia da Província Costeira do Rio Grande do Sul (modificado de Villwock, 1984).

3.2. Planície costeira do Rio Grande do Sul e seus sistemas deposicionais

A planície costeira do Rio Grande do Sul compõe a porção superior e exposta da Bacia de Pelotas. Trata-se de uma área plana, alongada na direção SO-NE por aproximadamente 600 km, e sua área superficial de aproximadamente 33.000 km², ocupada em sua maior parte por um sistema de lagos costeiros (Weschenfelder *et al.*, 2005). Esta planície costeira é constituída por dois sistemas deposicionais, o Sistema de Leques Aluviais e o Sistema de Laguna-Barreira (Villwock & Tomazelli, 1995) (Fig. 5).

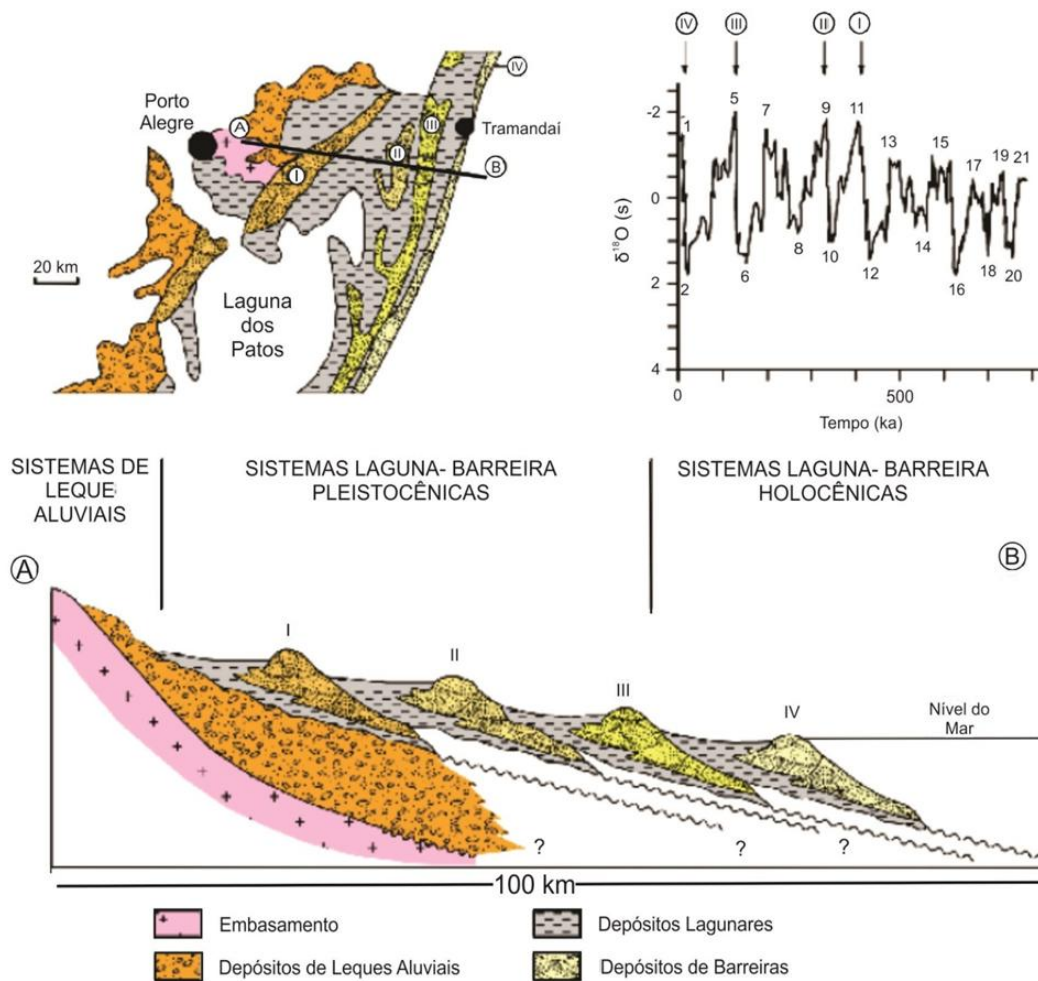


Figura 5. Perfil transversal dos sistemas deposicionais da Planície Costeira do Rio Grande do Sul com suas fácies sedimentares associadas. As barreiras estão correlacionadas com os picos da curva isotópica de oxigênio de Imbrie *et al.* (1984). (Modificado de Tomazelli & Villwock, 2005).

A deposição do Sistema de Leques Aluviais, provavelmente iniciou no Terciário e continuou durante todo o Quaternário com a intensidade controlada por mudanças nos ciclos de umidade e aridez que ocorreram neste período (Tomazelli *et al.*, 2000). Segundo Tomazelli *et al.* (2000) a composição e textura deste leques reflete a natureza da sua área fonte, sendo que ao norte são alimentados pelas rochas vulcânicas e sedimentares da bacia do Paraná e ao sul pelo escudo pré-cambriano. Os sedimentos que integram este sistema foram retrabalhados pelos diversos eventos transgressivos-regressivos geradores do sistema de barreiras (Tomazelli & Villwock, 2005).

O Sistema Laguna-Barreira foi desenvolvido no período Quaternário, durante quatro grandes oscilações glácio-eustáticas do nível do mar. Ele é composto por barreiras arenosas extensas e relativamente estreitas que isolam grandes corpos

lagunares, como a Lagoa dos Patos e as lagoas Mirim e Mangueira (Pereira, 2008). Cada sistema de barreira é registro de uma transgressão do nível marinho, sendo que dentre as quatro barreiras formadas, as três mais antigas são de idade pleistocênica (Villwock *et al.*, 1986).

O sistema Laguna-Barreira I é o mais interno, logo o mais antigo, e resultou do primeiro evento transgressivo-regressivo do nível do mar, datando aproximadamente 400 ka, equivalente ao estágio 11 da curva isotópica de oxigênio (Fig. 5) (Tomazelli & Villwock, 2000). A barreira foi desenvolvida na porção noroeste da planície costeira e, segundo Tomazelli *et al.* (2000), ela evoluiu principalmente por acumulação de areias eólicas.

O sistema Laguna-Barreira II foi formado durante o segundo ciclo transgressivo-regressivo do Pleistoceno, em aproximadamente 325 ka, sendo responsável pela formação inicial da Lagoa Mirim (Tomazelli & Villwock, 2005). De acordo com Tomazelli & Villwock (2000) tal fase corresponde ao estágio 9 da curva isotópica de oxigênio (Fig. 5).

O sistema Laguna-Barreira III é o que apresenta a barreira mais preservada e foi responsável pela formação final das lagoas dos Patos e Mirim (Tomazelli *et al.*, 2000). A idade deste sistema tem sido considerada como de 120 ka. (Villwock & Tomazelli, 1995). Segundo Tomazelli & Villwock (2000) o evento de mar alto que resultou neste sistema é correspondente ao estágio 5 da curva isotópica de oxigênio (Fig. 5).

O sistema mais recente, o sistema Laguna-Barreira IV, é o único holocênico e sua formação é consequência da última grande transgressão pós-glacial, quando o nível do mar atingiu entre 4 e 5 m acima do nível atual, há 5 ka (Villwock & Tomazelli, 1995). Este sistema é constituído pela atual linha de costa e diversas lagoas costeiras.

3.3. Lagoa dos Patos

Integrada à planície costeira do Rio Grande do Sul, a Lagoa dos Patos é um grande corpo lagunar parcialmente fechado, apresentando comprimento de 240 km, largura média de 40 km e profundidade média de 6 m (Toldo *et al.*, 2006). Segundo Kjerfve (1994), a lagoa é considerada a maior lagoa estrangulada do mundo (10.000 km²) representando uma das principais fontes de água da América do Sul. Orientada na direção tal qual a linha de costa, NE-SO, este corpo lagunar compõem o sistema

lagunar Patos- Mirim, conectando-se à Lagoa Mirim através do canal de São Gonçalo.

Na sua extremidade sul, a Lagoa dos Patos conecta-se ao Oceano Atlântico, gerando uma descarga média de 2088 m³ /s e uma taxa de exportação de matéria em suspensão de aproximadamente 1,3 × 10⁷ t/ ano (Marques *et al.*, 2010). Nesta mesma porção, com uma área de 900 km², encontra-se o estuário da Lagoa dos Patos, região de maior influência das águas marinhas que ingressam na lagoa através do canal mencionado.

A Lagoa dos Patos é fortemente influenciada pela ação do vento e pela descarga fluvial (Möller *et al.*, 2001). O aporte fluvial dentro da laguna se dá através da bacia hidrográfica do Guaíba, onde os principais contribuintes são os rios Jacuí e o Taquari, e pelo rio Camaquã. Em consequência do elevado volume de água doce que chega à Lagoa dos Patos, as águas da laguna apresentam salinidade baixa, de aproximadamente 3 ‰ (Toldo *et al.*, 2006). A lagoa é pouco influenciada pela maré astronômica, cuja amplitude é de 0,45 m e tanto o fundo como as margens dela são influenciados por ondas de até 1,6 m de altura (Toldo, 1994; Toldo *et al.*, 2000).

Do ponto de vista sedimentar, o corpo lagunar pode ser dividido em duas regiões morfológicas e sedimentológicas distintas, sendo a primeira região corresponde às margens arenosas e a segunda ao fundo lamoso e plano da laguna (Toldo, 1994). As lamas depositadas no piso lagunar são derivadas principalmente do Rio Guaíba e a deposição destes sedimentos ocorre em profundidades abaixo do nível base de erosão por ação das ondas (Toldo, 1994). Dados sedimentológicos demonstram que a Lagoa dos Patos é uma fonte significativa de sedimentos finos para a costa adjacente e a plataforma continental interna da região do Atlântico Sul, devido ao transporte de grandes quantidades de sedimentos em suspensão da bacia de drenagem da Lagoa dos Patos (mais de 2.000.000 km²) (Calliari *et al.*, 2009).

De acordo com o modelo de evolução da atual planície costeira do Rio Grande do Sul proposta por estudos pretéritos (Villwock *et al.*, 1986; Villwock & Tomazelli, 1995; Tomazelli & Villwock, 2000), o isolamento da Lagoa dos Patos foi iniciado pela formação da barreira III durante o Pleistoceno tardio (120.000 AP). Contudo, foi a partir da última transgressão do Holoceno (5500 AP) que a lagoa foi enclausurada, por meio do retrabalhamento da barreira formada mais recentemente (barreira IV). As ondas costeiras e as correntes marítimas geradas por ondas fecharam progressivamente a barreira, com exceção de um canal através do qual as

águas da extensa bacia de drenagem forçaram seu caminho para o oceano (Calliari *et al.*, 2009).

Diversos autores (Toldo *et al.*, 1991; Weschenfelder *et al.*, 2008a, 2008b, 2010, 2014; Santos-Fisher *et al.*, 2016), com base em dados sísmicos e palinológicos, apontam que a laguna já apresentou outro canal de conexão com o oceano, o canal da Barra Falsa, gerado pela drenagem do rio Camaquã durante a última glaciação. No entanto, tal hipótese foi questionada e debatida por Tomazelli *et al.* (2014). Através de levantamentos de georradar realizados no Banhado do Taim por Tomazelli *et al.* (2009), outro local de ruptura da barreira foi encontrado, onde um vale inciso que conectava a Lagoa Mirim ao mar foi identificado.

3.4. Plataforma Continental do Rio Grande do Sul

A plataforma continental do Rio Grande do Sul (RS) está inserida na Bacia de Pelotas, apresentando em média 130 km de largura, profundidades máximas variando entre 100 e 140 m e o valor médio da região de quebra da plataforma em aproximadamente 120 m de profundidade (Corrêa *et al.*, 1996). A batimetria, descrita por Corrêa (1990), apresenta alternância quanto ao comportamento das linhas, uma vez que na porção norte e centro-norte da plataforma, elas são paralelas e não há evidência de altos topográficos. Já na porção centro-sul e sul foi mostrado pelo autor que as linhas demonstram-se irregulares e com a presença de diversos altos topográficos. De modo geral, a plataforma é homogênea, com morfologia superficial suave e declividade bastante amena na ordem de 0,5 m a 1,5 m/km (Martins & Corrêa, 1996).

A linha costeira do estado do RS é praticamente contínua, no entanto, como descrito anteriormente, na porção sul do estado, esta continuidade é interrompida por um *inlet*, o canal de Rio Grande, que conecta o estuário da Lagoa dos Patos ao oceano Atlântico. A desembocadura do estuário marca uma distinção no fundo marinho, separando um fundo homogêneo e sem irregularidades ao sul de um com a presença de bancos lineares de crista e cava pronunciadas ao norte (Calliari & Fachin, 1993).

Martins *et al.* (1967) estudando as plataformas sul-brasileira e uruguaia delimitaram três principais províncias faciológicas formadas por uma sequência arenosa interna, entre 20 e 40 m de profundidade composta por areias quartzosas recentes retrabalhadas em depósitos pleistocênicos, uma sequência transicional

mista de areia e lama, e uma sequência lamítica externa depositada no Wisconsiniano, quando a rede fluvial abrangia o platô continental. Nas proximidades da desembocadura do estuário ocorre uma cobertura de sedimentos síltico-argilosos da fácies Patos, provenientes do sistema lagunar Patos-Mirim (Calliari & Fachin, 1993). Associados aos corpos arenosos estão depósitos bioclásticos alongados que foram interpretados como indicadores de paleolinha de costa (Corrêa & Ade, 1987).

A plataforma interna e a planície costeira do RS foram moldadas por diversas oscilações de nível do mar durante o Quaternário, resultando em conformações geomorfológicas e sedimentológicas. Dentre estas, estão os quatro sistemas distintos laguna-barreira resultantes de quatro ciclos trans-regressivos marinhos preservados na planície costeira atual (Tomazzeli *et al.*, 2000). Tais períodos de variação de nível do mar ainda podem ser evidenciados por feições topográficas submersas como linhas de praias, planos de marés, cordões arenosos, rochas de praia, planos lagunares e cursos fluviais, associados às características dos sedimentos que os acompanham, bem como a associação da fauna e flora presente nos sedimentos que compõem estas feições topográficas (Corrêa, 1996; Calliari *et al.*, 1998).

Outro importante indício que marca estas variações nas camadas sedimentares submersas são os paleocanais entalhados na plataforma. Abreu & Calliari (2005) encontraram na porção sul da plataforma interna feições descritas como paleovales, que seriam, de acordo com os autores, remanescentes da antiga drenagem do rio Camaquã. Segundo Weschenfelder *et al.* (2010), o sistema de paleodrenagem identificado ao sul de Bojuru pode estar vinculado a estes sistemas. Camargo (2012) encontrou, nas proximidades da região do Estreito, vários paleocanais e considerando a quantidade e posição dos mesmos o autor reforçou a hipótese de que estes representem o antigo delta do rio Camaquã. Ainda, na área da borda do talude, Silva (2009) encontrou dois cânions submarinos, os quais foram associados à presença de drenagem na plataforma continental em regime de mar baixo. O autor identificou um dos cânions como sendo vinculado ao sistema de drenagem sul-leste do Rio Grande do Sul, que engloba toda a bacia do Guaíba e rio Camaquã. O segundo cânion estaria relacionado com o sistema de drenagem sudeste, proveniente do Uruguai, cujas projeções se encontram no baixo Taim.

3.5. Quadro Oceanográfico e Climatológico da plataforma continental

As regiões costeiras e de plataforma têm sua conformação e configuração morfológica através de processos costeiros e oceânicos, os quais são influenciados por aspectos meteorológicos.

3.5.1. Caracterização hidrodinâmica

Na plataforma atuam duas correntes oceânicas, a Corrente do Brasil, transportando águas quentes e mais salinas e a Corrente das Malvinas, que transporta águas mais frias e de salinidade menor. Os sistemas de correntes que atuam sobre a plataforma sul-americana oriental podem influir no transporte sedimentar, assim como na modelagem e retrabalhamento das formas de relevo, principalmente nas ondas de areia, as *sandwaves*, em profundidades maiores do que 40-60 metros (Weschenfelder, 2005).

A costa do RS é dominada pela ação das ondas, responsáveis pelo transporte e deposição dos sedimentos na porção subaérea e submersa do litoral. De acordo com Pianca *et al.* (2010) as ondas de maior altura ocorrem no outono quando provenientes de sudeste. A incidência de ondas oblíquas gera correntes litorâneas e transporte longitudinal de sedimento, sendo que a direção desta corrente é governada quase integralmente pela direção e intensidade da componente longitudinal do vento na costa (Fontoura, 2004). Vários indicadores geomorfológicos confirmam a deriva litorânea resultante em direção NE ao longo de toda a costa do Rio Grande do Sul (Tomazelli & Villwock, 1992).

A origem dos ventos regionais que afetam a costa do Rio Grande do Sul relaciona-se, basicamente, com os dois sistemas de alta pressão que atuam nesta região: o Anticiclone do Atlântico Sul e o Anticiclone Migratório Polar (Cuchiara *et al.*, 2006). O regime de ventos sofre uma variação sazonal bem acentuada na costa gaúcha, sendo os de quadrante N-NE, NE e de E-NE predominante entre os meses de setembro a abril e os ventos de S e O prevalente entre maio e outubro (Motta, 1969).

O regime das micromarés atuante na região é semidiurno e seu alcance médio é de apenas 0,5 m. Tratando-se de marés meteorológicas, aquelas geradas por eventos extremos de tempestades, o alcance é um pouco maior, na ordem de 1 a 2 metros, levando a alterações morfológicas marcantes no prisma praial (Calliari *et al.*, 1998).

3.5.2. Caracterização climatológica

A região costeira do Rio Grande do Sul está situada na Zona Subtropical Sul e tem seu clima basicamente controlado por massas de ar de origem tropical marítima e polar marítima. Segundo Nimer (1977), o clima é mesotérmico brando, superúmido, sem estação seca. A temperatura média anual oscila entre 16 e 20°C. A precipitação varia de 1.000 a 1.500 mm e é distribuída uniformemente ao longo do ano. A circulação atmosférica no Rio Grande do Sul é fortemente influenciada pelo impacto do ENSO (El Niño) (Dillenburg *et al.*, 2009). A obstrução dos sistemas frontais S-SW pode durar muitos dias ou mesmo semanas, resultando num aumento da precipitação pluviométrica no Brasil durante os eventos El Niño. Mudanças na circulação atmosférica impulsionadas pelo ENSO também afetam o clima de ondas e correntes litorâneas (Dillenburg *et al.*, 2009), podendo mudar a direção das mesmas.

4. Materiais e métodos

4.1. A sísmica de reflexão

O método sísmico é um meio de investigação indireto de um terreno, seja ele submerso ou não, através da propagação de ondas sísmicas (elásticas) geradas artificialmente. A velocidade de propagação das ondas emitidas é definida como função de suas constantes elásticas, como o módulo de Young (E), módulo de rigidez (m), módulo de Poisson (n) e módulo de compressão (k) (Ayres Neto, 2000). Estas constantes variam de acordo com o meio em que a onda acústica é propagada.

O comportamento da onda sísmica no meio ao qual vem se propagando varia a medida que atinge um outro meio de diferente densidade. Diz-se então que há uma diferença de impedância acústica entre os meios. Por definição, a impedância acústica (I) é o produto entre a velocidade do som (V) e a densidade (r) de um determinado meio (Ayres Neto, 2000).

Havendo este contraste entre meios, onda sísmica tem uma parte da sua energia refletida, refratada e difratada retornando à superfície.

A sísmica de reflexão analisa a porção da energia que é refletida e captada pelo sensor. Esta reflexão das ondas acústicas só acontece quando existe discrepância expressiva entre os meios, e quanto maior o contraste de impedância,

maior o retorno do sinal. Teoricamente, corpos extremamente homogêneos não refletem as ondas acústicas, até que estas encontrem obstáculos ou interfaces acústicas (Souza, 2006).

Em ambientes submersos, este tipo de sismica pode ser empregado através de diversos tipos de equipamentos, mas o caminho entre a geração do pulso acústico e a recepção do mesmo ao retornar é o mesmo. As ondas são produzidas por uma fonte dentro de um espectro de frequência estipulado, o qual é determinado de acordo com a finalidade de estudo. Frequências mais altas (500 Hz até 12 kHz), como a utilizada neste estudo (3,5 kHz) produzem registros de alta resolução e sofrem com maior atenuação do meio, logo penetram apenas até as primeiras camadas abaixo do fundo (Judd & Hovland, 1992). De modo oposto funcionam as frequências mais baixas, as quais a penetração chega a maiores profundidades no sedimento, mas com uma menor resolução do registro.

Uma vez emitido o pulso acústico, ele viaja pelo meio, encontra um corpo que, por ser de impedância acústica diferente, faz com que haja a reflexão do sinal de volta a superfície (Fig. 6). Esta onda refletida é recebida pelo mesmo sensor que emitiu a onda inicial ou então por outro receptor acoplado ou rebocado pela embarcação. O sinal recebido é convertido em sinal elétrico e registrado pelo processador. Estes registros então são armazenados e convertidos em um sismograma, a partir do qual se pode analisar as feições do fundo e sub-fundo.

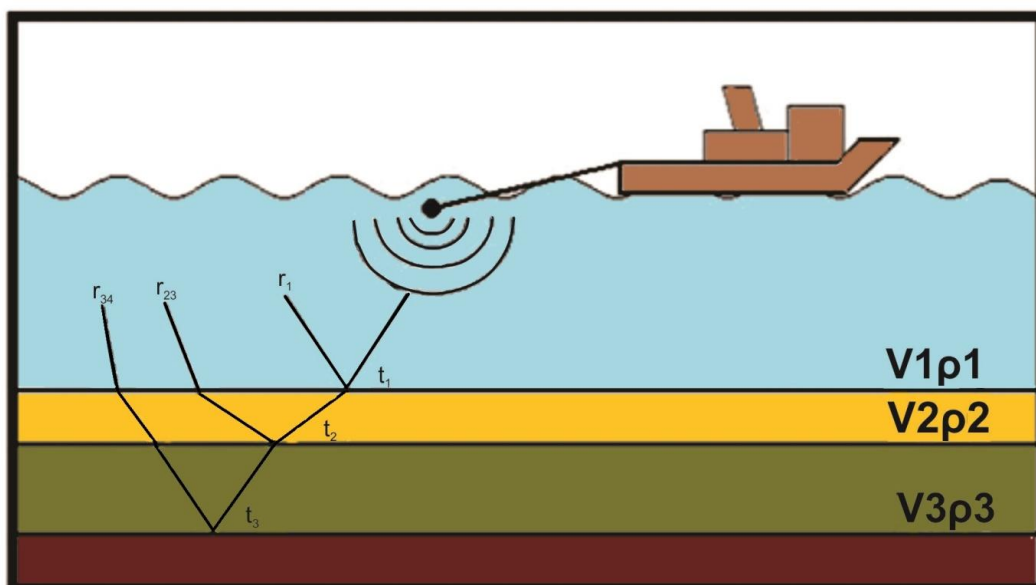


Figura 6. Representação da aquisição sísmica em um ambiente marinho (modificado de Ayres Neto, 2000).

4.2. Aquisição e processamento dos dados sísmicos

Os perfis sísmicos foram coletados entre os anos de 2009 a 2014 a bordo do Navio Oceanográfico Atlântico Sul, pertencente à Universidade Federal do Rio Grande (FURG) durante cruzeiros do programa Amazônia Azul. A posição da rota da embarcação e das 65 linhas sísmicas amostradas foi determinada por um sistema de posicionamento global diferencial (DGPS) (Fig. 7).

Para aquisição dos dados, foi utilizado o perfilador de subsuperfície Bathy 2010 *Chirp Sub Bottom Profiler*, composto por um sistema de aquisição de dados (*Sonar Unit*) Bathy 2010, servidor Bathy 2010, transmissor de força linear 5-30 KW (*LPT - Linear Power Transmitter*), e quatro transdutores de diferentes frequências: TR-109 3,5 kHz, TC-12/34 12 kHz de banda larga (*Widebeam Transducer*), TC-12NB 12 kHz banda estreita (*Narrowbeam Transducer*), TC-2084 33 kHz. Os transdutores foram fixados na lateral do casco da embarcação, atuando simultaneamente como emissor e receptor do sinal acústico. O conjunto de dados foi salvo em formato digital SEG-Y.

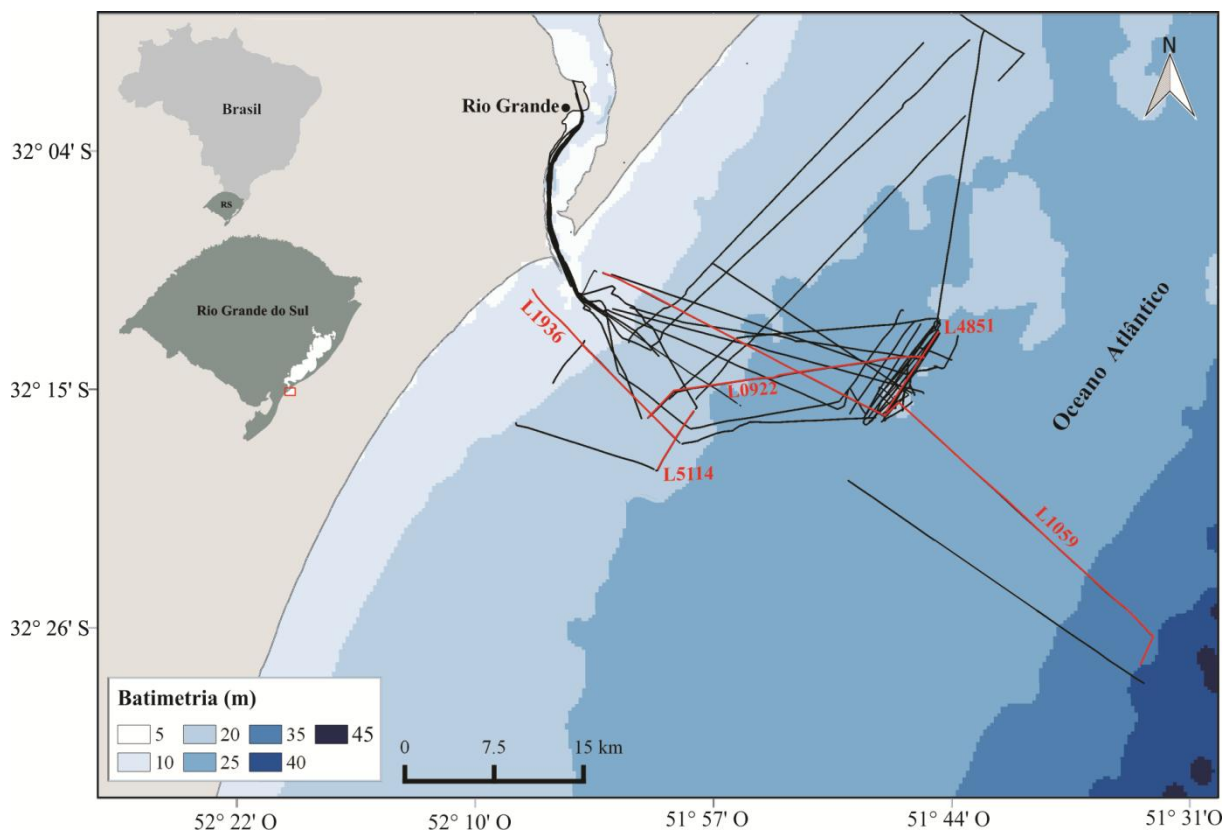


Figura 7. Linhas sísmicas coletadas sobre a área estudada.

Apesar do dado de sísmica rasa geralmente apresentar alta resolução, muitas vezes torna-se impraticável sua visualização devido a grande quantidade de ruídos, sendo necessário algum tipo de tratamento pós-aquisição (Gomes *et al.*, 2011).

O processamento e interpretação dos sismogramas foi realizado através do *software* ReflexW. Através do *software* foi possível formatar os dados brutos. No decorrer do processamento a geometria das linhas sísmicas foi aprimorada, com inserção de coordenadas, remoção da lâmina d'água e extração de traços com ruídos. Também, foi aplicado o ganho manual e as múltiplas de fundo existentes foram atenuadas. Estas etapas possibilitaram uma análise mais precisa dos registros sísmicos, visto que destacaram feições e removeram imperfeições dos mesmos.

4.3. Análise dos dados sísmicos

Para a análise dos dados e posterior caracterização das formas de gás existentes, a velocidade da onda acústica na água foi considerada 1.500 m/s e no sedimento 1.650 m/s (Jones, 1999).

A identificação e distinção das feições gasosas observadas através dos registros basearam-se na sua morfologia, dimensão e assinatura sísmica. Tal processo também permitiu avaliar a concentração aparente da camada gasosa no sedimento, permitindo reconhecer um modo levemente disseminado, moderadamente disseminado e disseminado. A definição de cada forma encontrada foi baseada nas feições descritas em trabalhos prévios.

A **cortina de gás** ou bolsão de gás apresenta morfologia bem definida na forma de “caixas” de anomalias sísmicas. O topo normalmente apresenta conformação levemente horizontal e as terminações laterais são abruptas podendo apresentar forma convexa. Abaixo dos refletores de topo, a resposta acústica é normalmente caótica, mascarando as estruturas sedimentares (Weschenfelder *et al.*, 2006; 2014) e impedindo estabelecer conexão com a fonte de gás. Sua dimensão lateral varia de poucos metros a quilômetros e é comum a interrupção repentina do refletor de topo, formando janelas acústicas.

O **blanking acústico**, assim como a cortina acústica, é caracterizado por uma forte e consistente reflexão de topo e um mascaramento dos refletores subjacentes. O topo é geralmente plano com limites laterais difusos.

A **turbidez acústica** é uma forma de acumulação de gás caracterizada por um refletor de topo irregular e menos pronunciado do que as feições descritas anteriormente. Os refletores abaixo do topo não são totalmente encobertos, permitindo a identificação e mapeamento das estruturas sedimentares subjacentes (Judd & Hovland, 1992). As reflexões são caóticas, resultantes do espalhamento da energia acústica que gera uma mancha mais escura no registro (Davis, 1992).

Os **pináculos acústicos** ou pináculos de turbidez são uma variedade de blanking e aparecem como uma frente em forma de “tenda” encobrindo completamente os refletores subjacentes (Iglesias & García-Gil, 2007). Podem emergir verticalmente em dimensões que não ultrapassem 2 ms de altura (Félix & Mahiques, 2013).

A identificação da **pluma intra-sedimentar** foi ainda menos ocorrente uma vez que aparece uma única vez nos perfis analisados. Esta feição pode ser caracterizada como um refletor parabólico que cruza refletores reais (Iglesias & García-Gil, 2007). São semelhantes em formato com as plumas acústicas que ocorrem na coluna da água e podem estar relacionadas com pequenos bolsões de gás no sedimento (Félix & Mahiques, 2013).

Descritas cada forma de acumulação de gás, foi possível criar um mapa de distribuição de feições. Com este foi possível visualizar onde a densidade do gás é maior e qual a morfologia dominante em cada região da área de estudo. No artigo “Gás raso na plataforma continental do Rio Grande do Sul, sul do Brasil”, produzido através desta dissertação, estão detalhados todos os resultados citados acima.

Referências bibliográficas

- Abreu, J.G.N. & Calliari, L.J. 2005. Paleocanais na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul: evidências de uma drenagem fluvial pretérita. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23 (2): 123-132.
- Albert, D.B., Martens, C.S. & Alperin, M.J. 1998. Biogeochemical processes controlling methane in gassy coastal sediments- Part 2: groundwater flow control of acoustic turbidity in Eckernforde Bay Sediments. *Continental Shelf Research*, 18: 1771-1793.
- Aliotta, S., Ginsberg, S.S., Giagante, D., Vecchi, L.G. & Salvatierra, M.M. 2014. Seismic stratigraphy of Pleistocene deltaic deposits in bahía blanca estuary, Argentina. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 86 (2), 649-662.
- Anderson, A.L. & Bryant, W.R. 1990. Gassy sediment occurrence and properties: Northern Gulf of Mexico. *Geo-Marine Letters*, 10: 209-220.
- Anka, Z., Berndt, C. & Gay, A. 2012. Hydrocarbon leakage through focused fluid systems in continental margins. *Marine Geology*, 332-334: 1-3.
- Asmus, H.E. & Porto, R. 1972. Classificação das bacias sedimentares brasileiras segundo a tectônica de placas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26, 1972, Belém. *Anais...*, Belém, ABEQUA, p. 67-90.
- Ayres Neto, A. 2000. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. *Revista Brasileira de Geofísica*, 18 (3): 241-256.
- Barboza, E.G. Rosa, M.L.C.C. Hesp, P.A., Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J. & Ayup-Zouain, R.N. 2011. Evolution of the Holocene Coastal Barrier of Pelotas Basin (Southern Brazil) - a new approach with GPR data. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 646-650.
- Calliari, L.J. & Fachin, S. 1993. Laguna dos Patos. Influência nos depósitos lamíticos costeiros. *Pesquisas em Geociências*, 20(1): 57-89.
- Calliari, L.J., Tozzi, H.A.M. & Klein, A.H.F. 1998. Beach morphology and coastline erosion associated with storm surges in southern Brazil, Rio Grande to Chuí. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 70(2): 231-247.
- Calliari, L.J., Winterwerp, J.C., Fernandes, E., Cuchiara, D., Vinzon, S.B., Sperle, M. & Holland, K.T. 2009. Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon– Cassino beach sedimentary system. *Continental Shelf Research*, 29 (3): 515-529.

- Camargo, R.S.V. 2012. *Distribuição dos sedimentos superficiais e sua possível correlação com paleocanais na plataforma interna do Rio Grande do Sul*. Rio Grande, 69p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Oceanologia, Instituto Oceanográfico, Universidade Federal do Rio Grande.
- Claypool, G.E. & Kvenvolden, K.A. 1983. Methane and other hydrocarbon gases in marine sediment. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 11: 299-327.
- Corrêa, I.C.S. 1990. *Analyse morphostructurale et evolution paleogeographique de la plate-forme continentale atlantique sub-brasilienne (Rio Grande do Sul- Bresil)* Bourdeaux, 314p. Tese de Doutorado - Universidade de Bourdeaux, França.
- Corrêa, I.C.S. 1996. Les variations du niveau de la mer durant les derniers 17.500 ans BP. L'exemple de la plateforme continentale du Rio Grande do Sul- Bresil. *Marine Geology*, 130: 163-178.
- Corrêa, I.C.S. & Ade, A.B. 1987. Contribuição ao estudo da paleogeografia da plataforma continental do Rio Grande do Sul. *In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO*, 1, 1987, Porto Alegre. *Anais...*, Porto Alegre, ABEQUA, p. 37–48.
- Corrêa, I.C.S., Martins, L.R.S., Ketzer, J.M.M., Elias, A.R.G. & Martins, R. 1996. Evolução sedimentológica e paleogeográfica na plataforma continental sul e sudeste do Brasil. *Notas Técnicas*, 9: 51–61.
- Cuchiara, D., Fernandes, E.H., Strauch, J.C. & Calliari, L.J. 2006. Modelagem numérica do comportamento das ondas na costa do Rio Grande do Sul. *In: SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA*, 2, 2006, Rio Grande. *Anais...*, Rio Grande, SEMENGO, p. 15.
- Cukur, D., Krastel, S., Tomonaga, Y., Çagaty, M.N. & Meydan, A.F. 2013. Seismic evidence of shallow gas from Lake Van, eastern Turkey. *Marine and Petroleum Geology*, 48: 341-353.
- Davis, A.M. 1992. Shallow gas: an overview. *Continental Shelf Research*, 12: 1077-1079.
- Diez, R., García-Gil, S., Durán, R. & Vilas F. 2007. Gas accumulations and their association with particle size distribution patterns in the Ría de Arousa seabed (Galicia, NW Spain): an application of discriminant analysis. *Geo-Marine Letters*, 27: 89–102.
- Dillenburg, S.R. 1988. *Contribuição à Evolução Paleogeográfica Quaternária da plataforma continental do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 77p. Dissertação

- de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Tomazelli, L.J., Hesp, P.A., Clerot, L.C.P. & Ayup-Zouain, R.N. 2009. The Holocene Coastal Barriers of Rio Grande do Sul. *In*: Dillenburg, S.R. & Hesp, P.A. (Eds). *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, v. 107, p. 53-91.
- Dondurur, D., Çifçi, G., Drahnor, M.G. & Coskun, S. 2011. Acoustic evidence of shallow gas accumulations and active pockmarks in the İzmir Gulf, Aegean sea. *Marine and Petroleum Geology*, 28: 1505–1516.
- Durán, R., García-Gil, S., Diez, R. & Vilas, F. 2007. Stratigraphic framework of gas accumulations in the Ría de Pontevedra. *Geo-Marine Letters*, 27: 77–88.
- Félix, C.A. & Mahiques, M.M. 2013. Late quaternary evolution and shallow gas formation in a tropical estuarine environment: the case of the Bertioga channel, Brazil. *In*: IEEE/OES ACOUSTICS IN UNDERWATER GEOSCIENCES SYMPOSIUM, 2013, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, p. 1-8.
- Figueiredo Jr., A.G., Nittrouer, C.A. & Costa, E.A. 1996. Gas-charged sediments in the Amazon submarine delta. *Geo-Marine Letters*, 16: 31-35.
- Floodgate, G.D. & Judd, A.G. 1992. The origins of shallow gas. *Continental Shelf Research*, 12: 1145–1156.
- Fontana, R.L. 1989. Investigações geofísicas sobre o Cone do Rio Grande, Bacia de Pelotas, Brasil. *In*: SIMPÓSIO SUL BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 4, Porto Alegre, 1989. *Anais...*, Porto Alegre, SSBG, p. 161-170.
- Fontana, R.L. 1990. Desenvolvimento Termomecânico da Bacia de Pelotas e Parte Sul da Plataforma de Florianópolis. *In*: Raja Bagaglia, G.P. & Milani, E.J. (Eds.). *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. Petrobrás - Rio de Janeiro, Brasil, 377-400.
- Fontoura, J.A. 2004. *Hidrodinâmica costeira e quantificação do transporte longitudinal de sedimentos não coesivos na zona de surfe das praias adjacentes aos molhes da barra do Rio Grande, RS, Brasil (Aplicação às praias do Cassino, Mar Grosso e adjacências dos Molhes Leste e Oeste da desembocadura do estuário da Lagoa dos Patos)*. Porto Alegre, 232p. Tese de doutorado- Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e

- Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- García-Gil, S., García-García, A. & Vilas, F. 1999. Identificación sísmico-acústica de las diferentes formas de aparición de gas en la Ría de Vigo (NW, España). *Revista Sociedad Geológica de España*, 12 (2): 301–307.
- García-Gil, S., Vilas, F. & García-García, A. 2002. Shallow gas features in incised-valley fills (Ría de Vigo, NW Spain): a case study. *Continental Shelf Research*, 22: 2303–2315.
- Gomes, M.P., Vital, H. & Macedo, J.W.P. 2011. Fluxo de processamento aplicado a dados de sísmica de alta resolução em ambiente de plataforma continental. Exemplo: Macau- RN. *Revista Brasileira de Geofísica*, 29 (1): 173-186.
- Hagen, R.A. & Vogt, P.R. 1999. Seasonal variability of shallow biogenic gas in Chesapeake Bay. *Marine Geology*, 158: 75–88.
- Hill, J.M., Halka, J.P., Conkwright, R., Koczot, K. & Coleman, S. 1992. Distribution and effects of shallow gas on bulk estuarine sediments properties. *Continental Shelf Research*, 12: 1219-1229.
- Hovland, M., Judd, A.G. & Burke Jr., R.A. 1993. The global flux of methane from shallow submarine sediments. *Chemosphere*, 26: 559-578.
- Iglesias, J. & García-Gil, S. 2007. High-resolution mapping of shallow gas accumulations and gas seeps in San Simon Bay (Ría de Vigo, NW Spain). Some quantitative data. *Geo-Marine Letters*, 27: 103-114.
- Imbrie, J., Hays, J.D., Martinson, D.G., McIntyre, A., Mix, A.C., Morley, J.J., Pisias, N.G., Prell, W.L. & Shackleton, N.J. 1984. The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record. In: Berger, A.L., Imbrie, J., Hays, J.D., Kurla, G. & Saltzman, B. (Eds.). *Milankovitch and Climate, Part 1*. Boston, Reidel, p. 269- 305.
- Jones, E.J.W. 1999. *Marine Geophysics*. Chichester, Wiley & Sons, 520 p.
- Judd, A.G. 2003. The global importance and context of methane escape from the seabed. *Geo-Marine Letters*, 23: 147-154.
- Judd, A.G. & Hovland, M. 1992. The evidence of shallow gas in marine sediments. *Continental Shelf Research*, 12:1081–1095.
- Judd, A.G. & Hovland, M. 2007. *Seabed Fluid Flow, the Impact on Geology, Biology and the Marine Environment*. Cambridge , Cambridge University Press, 475 pp.

- Judd, A.G., Hovland, M., Dimitrov, L.I., García-Gil, S. & Jukes, V. 2002. The geological methane budget at Continental Margins and its influence on climate change. *Geofluids*, 2: 109-126.
- Kjerfve, B. 1994. Coastal lagoons. In: Kjerfve, B. (Ed.). *Coastal Lagoon Processes*. Amsterdam, Elsevier Oceanographic Series 60, p. 1–8.
- Klein, A.H.F., Demarco, L.F.W., Guessier, V., Flemming, G.R., Bonetti, J., Porpilho, D., Ayres Neto, A., Souza, J.A.G. & Félix, C.A. 2016. Shallow gas seismic structures: forms and distribution on Santa Catarina Island, Southern Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 64(4): 83-95.
- Marques, W.C., Fernandes, E.H.L., Moraes, B.C., Möller, O.O. & Malcherek, A. 2010. Dynamics of the Patos Lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the southern Brazilian inner shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115: C10045.
- Martens, C.S., Albert, D.B. & Alperin, M.J. 1998. Biogeochemical processes controlling methane in gassy coastal sediments- Part 1. A model coupling organic matter flux to gas production, oxidation and transport. *Continental Shelf Research*, 18: 1741-1770.
- Martins, L.R. & Corrêa, I.C.S. 1996. Morphology and Sedimentology of Southwest Atlantic Coastal Zone and Continental Shelf from Cabo Frio (Brazil) to Peninsula Valdes (Argentina). Porto Alegre, RS., Brasil. IOC—UNESCO / MCT / CPRM Publication, 20 maps and glossary, 74p.
- Martins, L.R., Urien, C.M. & Eichler, B.B. 1967. Distribuição dos sedimentos modernos da plataforma continental sul-brasileira e uruguaia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 21, 1967, Curitiba. *Anais...Curitiba*, CBG, p. 29-43.
- Möller, O.O., Castaing, P., Salomon, J.C. & Lazure, P. 2001. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*, 24, 297–311.
- Motta, V. 1969. *Relatório- diagnóstico sobre a melhoria e o aprofundamento do acesso pela barra de Rio Grande*. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS. 114p.
- Nimer, E.1977. Clima. In: Geografia do Brasil. Região Sul. Rio de Janeiro- IBGE, p. 35-79.

- Okyar, M. & Ediger, V. 1999. Seismic evidence of shallow gas in the sediment on the shelf off Trabzon, southeastern Black Sea. *Continental Shelf Research*, 19: 575-587.
- Oliveira, N. & Weschenfelder, J. 2015. Caracterização das acumulações de gás raso na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul. *In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO*, 15, 2015, Imbé e Tramandaí. *Anais... Imbé/Tramandaí, ABEQUA*, p. 50–51.
- Park, S.C., Lee, K.W. & Song, Y.I. 1995. Acoustic characters and distribution pattern of modern fine-grained deposits in a tide-dominated coastal bay: Jinhae Bay, Southeast Korea. *Geo-Marine Letters*, 15: 77-84.
- Pereira, C.M. 2008. *Reconhecimento e Mapeamento de Fácies Sísmicas em Perfis Sísmicos Localizados na Lagoa Dos Patos, RS - Brasil*. Porto Alegre, 73p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Pianca, C., Mazzini, P.L.F. & Siegle, E. 2010. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(1): 53-70.
- Pinet, N., Duchesne, M., Lavoie, D., Bolduc, A. & Long, B. 2008. Surface and subsurface signatures of gás seepgae in the St. Lawrence Estuary (Canada): Significance to hydrocarbon exploration. *Marine and Petroleum Geology*, 25: 271-288.
- Santos-Fischer, C.B., Corrêa, I.C.S., Weschenfelder, J., Torgan, L.C. & Stone, J.R. 2016. Paleoenvironmental insights into the Quaternary evolution of the southern Brazilian coast based on fossil and modern diatom assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 446: 108-124.
- Schubel, J.R. & Schiemer, E.W. 1972. The cause of the acoustically impenetrable, or turbid, character of Chesapeake Bay sediments. *Marine Geophysical Research*, 2: 61-71.
- Silva, J.L.B. 2009. *Identificação do sistema de paleodrenagem na margem continental sul brasileira adjacente à Lagoa Mirim no Terciário superior por sísmica de reflexão*. Porto alegre, 239p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Souza, L.A.P. 2006. *Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas*. São Paulo, 311p. Tese de Doutorado, Programa de Pós- Graduação em Geociências, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.

- Toldo Jr., E.E. 1994. *Sedimentação, predição do padrão de ondas e dinâmica sedimentar da antepraia e zona de surfe do sistema lagunar da Lagoa dos Patos*. 1994. Porto Alegre, 143p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Toldo Jr., E.E., Ayup-Zouain, R.N., Corrêa, I.C.S. & Dillenburg, S.R. 1991. Barra Falsa: Hipótese de um Paleocanal Holocênico de Comunicação entre a Laguna dos Patos e o Oceano Atlântico. *Pesquisas em Geociências*, 18(2): 99-103.
- Toldo Jr., E.E., Dillenburg, S.R., Corrêa, I.C.S. & Almeida, L.E.S.B. 2000. Holocene sedimentation in Lagoa dos Patos lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 16(3): 816-822.
- Toldo Jr., E.E., Dillenburg, S.R., Corrêa, I.C.S., Almeida, L.E.S.B., Weschenfelder, J. & Gruber, N.L.S. 2006. Sedimentação de Longo e Curto Período na Lagoa dos Patos. *Pesquisas em Geociências*, 33(2): 79-86.
- Tomazelli, L.J. & Villwock, J.A. 1992. Considerações sobre o ambiente praiial e a deriva litorânea de sedimentos ao longo do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 19(1): 3-12.
- Tomazelli, L.J. & Villwock, J.A.. 2000. O Cenozóico no Rio Grande do Sul: Geologia da planície costeira. In: Holz, M. & De Ros, L.F. (Eds) *Geologia do Rio Grande do Sul*. CIGO/ UFRGS, Porto Alegre, p. 375-406.
- Tomazelli, L.J. & Villwock, J.A.. 2005. Mapeamento geológico de planícies costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul. *Gravel*, 3: 109-115.
- Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R. & Villwock, J.A. 2000. Late Quaternary geological history of Rio Grande do Sul coastal plain, Southern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3): 470–472.
- Tomazelli, L.J., Barboza, E.G., Dillenburg, S.R., Rosa, M.L.C.C., Caron, F., Lima, L.G. Andrade Ramos, A.J.L., Faccion, J.E. & Rangel, A.R. 2009. Projeto de estudo de vales incisos na porção sul da planície costeira do Rio Grande do Sul: um exemplo de sucesso na integração de métodos de investigação da evolução geológica de regiões costeiras. In: CONGRESO ARGENTINO DE CUATERNARIO Y GEOMORFOLOGÍA/ CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 4/12, 2009, La Plata. *Anais...*, La Plata, v.1, p.167.

- Tomazelli, L.J., Barboza, E.G., Dillenburg, S.R. & Rosa, M.L.C.C. 2014. Origem e Significado Geológico da “Barra Falsa”: Uma Feição Geomorfológica Peculiar da Margem Leste da Lagoa dos Patos/RS, Brasil. *Gravel*, 12 (1): 1-14.
- Tóth, Z., Spieß, V. & Jensen, J. 2014. Seismo-acoustic signatures of shallow free gas in the Bornholm Basin, Baltic Sea. *Continental Shelf Research*, 88: 228-239.
- Villwock, J.A. 1972. *Contribuição a geologia do Holoceno da Província Costeira do Rio Grande do Sul- Brasil*. Porto Alegre, 134p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Villwock, J.A. 1984. Geology of the Coastal Province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil: A Synthesis. *Pesquisas em Geociências*, 16: 5-49.
- Villwock, J.A. & Tomazelli, L.J. 1995. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. *Notas Técnicas*, 8:1–45.
- Villwock, J.A., Tomazelli, L.J., Loss, E.L., Denhardt, E.A., Horn, N.O., Bachi, F.A. & Denhardt, B.A. 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, 4: 79–97.
- Weschenfelder, J. 2005. *Processos sedimentares e variação do nível do mar na região costeira do Rio Grande do Sul- Brasil*. Porto Alegre, 142p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Weschenfelder, J., Corrêa, I.C.S. & Aliotta, S. 2005. Elementos arquiteturais do substrato da Lagoa dos Patos revelados por sísmica de alta resolução. *Pesquisas em Geociências*, 32(2): 57-67.
- Weschenfelder, J., Corrêa, I.C.S., Aliotta, S., Pereira, C.M. & Vasconcellos, V.E.B. 2006. Shallow gas accumulation in sediments of the patos lagoon, southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 78 (3): 607-614.
- Weschenfelder, J., Medeanic, S., Corrêa, I.C.S & Aliotta, S. 2008a. Holocenic Paleoinlet of the Bojuru Region, Lagoa dos Patos, Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, 24: 99-109.
- Weschenfelder, J., Corrêa, I.C.S., Toldo Jr., E.E. & Baitelli, R. 2008b. Paleocanais como indicativo de eventos regressivos quaternários do nível do mar no Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26: 367-375.
- Weschenfelder, J., Corrêa, I.C.S., Toldo Jr., E.E. & Baitelli, R. 2010. A Drenagem Pretérita do Rio Camaquã na Costa do RS. *Pesquisas em Geociências*, 37: 25-35.

- Weschenfelder, J., Baitelli, R., Corrêa, I.C.S., Bortolin, E.C. & Santos, C.B. 2014. Quaternary incised valleys in the southern Brazil coastal zone. *Journal of South American Earth Sciences*, 55: 83-93.
- Weschenfelder, J., Klein, A.H.F., Green, A.N., Aliotta, S., Mahiques, M.M., Neto, A.A., Terra, L.C., Corrêa, I.C.S., Calliari, L.J., Montoya, I., Ginsberg, S.S. & Griep, G.H. 2016. The control of palaeo-topography in the preservation of shallow gas accumulation: Examples from Brazil, Argentina and South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 172: 93-107.
- Wilkens, R.H. & Richardson, M.D. 1998. The influence of gas bubbles on sediment acoustic properties: *in situ*, laboratory, and theoretical results from Eckernforde Bay, Baltic sea. *Continental Shelf Research*, 18: 1859-1892.

**CAPÍTULO II – GÁS RASO NA PLATAFORMA CONTINENTAL DO RIO
GRANDE DO SUL, SUL DO BRASIL - SHALLOW GAS ON THE RIO GRANDE DO
SUL CONTINENTAL SHELF, SOUTHERN BRAZIL.**

(Artigo submetido à Revista Pesquisas em Geociências)

Gás raso na plataforma continental do Rio Grande do Sul, sul do Brasil

Shallow gas on the Rio Grande do Sul continental shelf, southern Brazil

Natacha de OLIVEIRA¹ & Jair WESCHENFELDER

⁽¹⁾ Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, Brasil. E-mail: natoliveiran@gmail.com, jair.weschenfelder@ufrgs.br.

Resumo. Na análise de perfis sísmicos de alta resolução (3,5 kHz), coletados na plataforma continental interna do Rio Grande Sul, foram observadas anomalias acústicas caracterizadas como sendo uma resposta à presença de gás intersticial no sedimento. As acumulações foram identificadas com base na morfologia, dimensão, tipo de assinatura acústica e concentração aparente de gás. Assim, cinco formas distintas de gás raso foram reconhecidas: cortina de gás, *blanking* acústico, turbidez acústica, pináculo de turbidez e pluma intra-sedimentar. Tais formas estão diretamente ligadas com a distribuição das fácies sedimentares, as quais agem como reservatório e selante, retendo ou não o gás e gerando as diferentes respostas acústicas. A ocorrência do gás está concentrada em frente à desembocadura da Lagoa dos Patos, local de deposição de sedimentos finos e matéria orgânica. Este aporte lagunar somado ao retrabalhamento da plataforma por eventos de regressão e transgressão marinha durante o Quaternário permitiram a gênese e preservação do gás existente em sedimentos holocênicos, levando a crer na sua provável origem biogênica.

Palavras-chave. Levantamentos sísmicos, Acumulações de gás, Evolução costeira

Abstract. The analysis of high resolution seismic profiles (3.5 kHz) collected on the inner continental shelf of Rio Grande do Sul revealed acoustic anomalous features related to the gas presence in the sediment interstices. The gas accumulations were identified based on the morphology, dimension, type of acoustic signature and apparent concentration of gas. Thus, five different forms of shallow gas were recognized: gas curtain, acoustic blanking, acoustic turbidity zone, turbidity pinnacle and intra-sedimentary plume. These forms are linked directly with the sedimentary facies distribution, which act like reservoir and sealant, retaining or not the gas and producing the distinct acoustic responses. The gas is concentrated in front of the mouth of Patos Lagoon, deposition site of fine sediments and organic matter. Such lagoon sediment input and the reworking of the shelf by marine regression and transgression events during the Quaternary allowed the genesis and preservation of gas occurring in Holocene sediments, which origin is probable biogenic.

Keywords. Seismic survey, Gas accumulations, Coastal evolution

1 Introdução

As acumulações de gás raso em sedimentos costeiros têm sido cada vez mais estudadas, revelando ser uma ocorrência comum nos mais variados ambientes antigos e recentes. Os ambientes sedimentares de deltas (Félix & Mahiques, 2013; Figueiredo *et al.*, 1996), lagoas costeiras (Cukur *et al.*, 2013; Weschenfelder *et al.*, 2006; 2016; Klein *et al.*,

2016), baías (Park *et al.*, 1995; Schubel & Schiemer, 1972), rias (Durán *et al.*, 2007; García-Gil *et al.*, 1999; 2002), estuários (Martens *et al.*, 1998; Pinet *et al.*, 2008), baías (Aliotta *et al.*, 2014; Klein *et al.*, 2016) e plataformas continentais (Okyar & Ediger, 1999; Tóth *et al.*, 2014; Oliveira & Weschenfelder, 2015) são exemplos da abrangência das ocorrências de gás e também representam evidências da relação e origem do sedimento gasoso com os processos de evolução costeira.

Além de representar um importante recurso econômico, a relevância do estudo de gás nos sedimentos marinhos reside na influência e impacto que a sua presença exerce sobre todo ambiente circundante. Através dos efeitos significativos no comportamento físico e características geoacústicas das camadas sedimentares, como o aumento do volume do sedimento pela presença de espaços preenchidos com gás (Hill *et al.*, 1992), pode haver instabilidade do fundo gerando consequências adversas para os projetos de engenharia, como exploração de recursos naturais, dragagem e construção de dutos (Hagen & Vogt, 1999). Ainda, a presença de gás pode modificar feições geológicas no fundo e sub-fundo marinho, como também os processos biológicos e a composição química dos oceanos (Judd & Hovland, 2007). Sendo que sua liberação representa também a entrada de gases de efeito estufa no sistema oceânico-atmosférico, este ainda pode ajudar a decifrar as mudanças paleoclimáticas e entender as modificações do futuro uma vez que influencia no balanço de carbono (Anka *et al.*, 2012).

Dentre os gases presentes nos sedimentos de ambientes marinhos o metano é o mais abundante (Claypool & Kvelvolden 1983; Dondurur *et al.*, 2011). Este gás pode ser gerado tanto por processos biogênicos quanto por processos termogênicos, entretanto, em ambos os casos, o gás resulta da degradação da matéria orgânica. Uma vez formado, a presença do gás metano intersticial nos sedimentos pode assumir formas que são detectáveis aos perfiladores sísmicos. Setores com bolhas de gás espalham a energia acústica, mascarando os horizontes do sedimento abaixo e dando origem a uma zona de turbidez acústica em registros de sub-superfície (Judd & Hovland, 1992).

Na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul (RS), estudos com uso de sísmica de reflexão em águas rasas são escassos até o momento e com isso a presença de gás na área ainda não foi detalhada de modo aprofundado. Com intuito de melhor compreender a presença do gás e contribuir com estudos de evolução geológica da planície costeira do RS e da plataforma adjacente, este estudo descreve e discute as feições de gás presentes, localização e abrangência das mesmas. Através disso, pretende-se constatar a hipótese de que tais feições são derivadas do retrabalhamento de matéria orgânica depositada nos paleoambientes criados a partir das oscilações do nível do mar durante o período Quaternário.

2 Área de estudo, materiais e métodos

2.1 Localização da área de estudo

A plataforma continental do Rio Grande do Sul (RS) está inserida na Bacia de Pelotas, apresentando em média 130 km de largura, profundidades máximas variando entre 100 e 140 m e o valor médio da região de quebra da plataforma em aproximadamente 120 m de profundidade (Corrêa *et al.*, 1996). De modo geral, a plataforma é homogênea, com morfologia superficial suave e declividade bastante baixa na ordem de 0,5 m a 1,5 m/km (Martins & Corrêa, 1996). A área estudada encontra-se na porção sul da plataforma interna do RS, delimitada entre os paralelos 32°00'S e 32°35'S e isóbatas de 5 m a 45 m aproximadamente (Fig. 1).

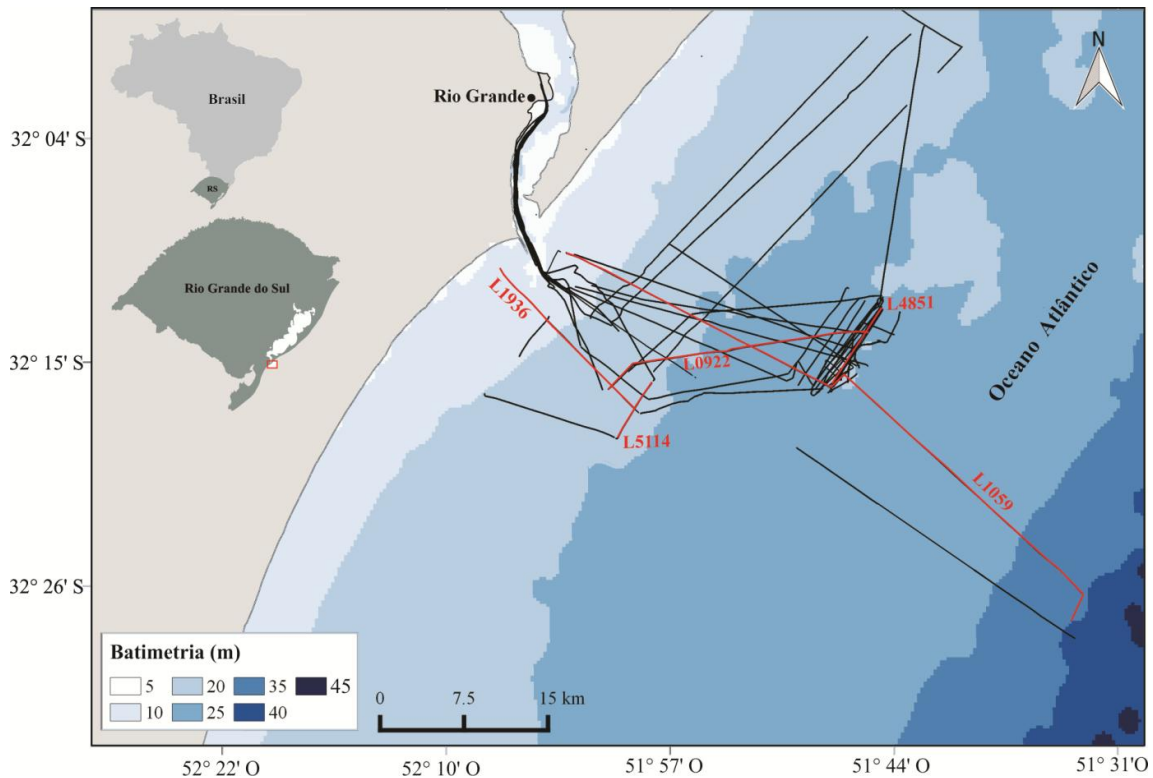


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo, linhas sísmicas interpretadas e, em vermelho, linhas sísmicas descritas neste artigo.

Figure 1. Geographic location of the study area, seismic lines interpreted and, in red, seismic lines described in this paper.

A linha costeira do estado do RS é praticamente contínua, no entanto, na porção sul do estado, esta continuidade é interrompida por um *inlet*, o canal de Rio Grande, que conecta o estuário da Lagoa dos Patos ao oceano Atlântico. A desembocadura do estuário marca uma distinção no fundo marinho, separando um fundo homogêneo e sem irregularidades ao sul de

outro com a presença de bancos lineares de crista e cava pronunciadas ao norte (Calliari & Fachin, 1993).

Martins *et al.* (1967) estudando as plataformas sul-brasileira e uruguaia delimitaram três principais províncias faciológicas formadas por uma sequência arenosa interna, entre 20 e 40 m de profundidade composta por areias quartzosas recentes retrabalhadas em depósitos pleistocênicos, uma sequência transicional mista de areia e lama, e uma sequência lamítica externa depositada no Wisconsiniano, quando a rede fluvial abrangia o platô continental. Nas proximidades da desembocadura do estuário da Lagoa dos Patos ocorre uma cobertura de sedimentos siltico-argilosos da fácies Patos, provenientes do sistema lagunar Patos-Mirim (Calliari & Fachin, 1993). Associados aos corpos arenosos estão depósitos bioclásticos alongados que foram interpretados como indicadores de paleolinha de costa (Corrêa & Ade, 1987).

A plataforma interna e a planície costeira do RS foram moldadas por diversas oscilações de nível do mar durante o Quaternário, resultando em conformações geomorfológicas e sedimentológicas. Dentre estas, estão os quatro sistemas distintos laguna-barreira resultantes de quatro ciclos trans-regressivos marinhos preservados na planície costeira atual (Tomazzeli *et al.*, 2000). Tais períodos de variação de nível do mar ainda podem ser evidenciados por feições topográficas submersas como linhas de praias, planos de marés, cordões arenosos, rochas de praia, planos lagunares e cursos fluviais, associados às características dos sedimentos que os acompanham, bem como a associação da fauna e flora presente nos sedimentos que compõem estas feições topográficas (Corrêa, 1996; Calliari *et al.*, 1998). Estas configurações de fundo podem estar associadas com as ocorrências de gás ou então ter favorecido sua gênese.

2.2 Materiais e métodos

Os perfis sísmicos aqui considerados foram coletados entre os anos de 2009 a 2014 a bordo do Navio Oceanográfico Atlântico Sul, pertencente à Universidade Federal do Rio Grande (FURG), durante cruzeiros do programa Amazônia Azul. A posição da rota da embarcação e das 65 linhas sísmicas amostradas foi determinada por um sistema de posicionamento global diferencial (DGPS).

Para aquisição dos dados, foi utilizado o perfilador de subsuperfície Bathy 2010 *Chirp Sub Bottom Profiler*, composto por um sistema de aquisição de dados (*Sonar Unit*) Bathy 2010, servidor Bathy 2010, transmissor de força linear 5-30 KW (LPT - *Linear Power Transmitter*), e quatro transdutores de diferentes frequências: TR-109 3.5 kHz, TC-12/34 12

kHz de banda larga (*Widebeam Transducer*), TC- 12NB 12 kHz banda estreita (*Narrowbeam Transducer*), TC-2084 33 kHz. Os transdutores foram fixados na lateral do casco da embarcação, atuando simultaneamente como emissor e receptor do sinal acústico. O conjunto de dados foi salvo em formato SEG-Y. O processamento e interpretação dos sismogramas foi realizado através do *software* ReflexW. A velocidade da onda acústica na água foi considerada 1500 m/s e no sedimento 1650 m/s (Jones, 1999).

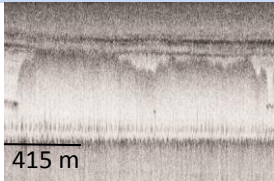
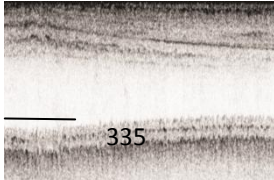
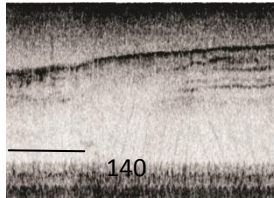
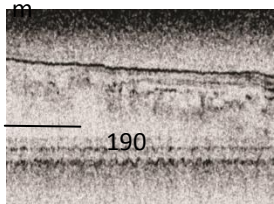
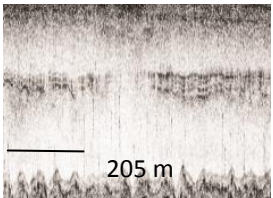
A identificação e distinção das feições gasosas observadas através dos registros basearam-se na sua morfologia, dimensão e assinatura sísmica. Tal processo também permitiu avaliar a concentração aparente da camada gasosa no sedimento, permitindo reconhecer um modo levemente disseminado, moderadamente disseminado e disseminado.

3 Resultados

Nos registros sísmicos foram encontradas respostas acústicas anômalas através das quais foi possível identificar e mapear as acumulações gasosas na porção estudada da plataforma continental interna do RS. A concentração aparente da camada gasosa no sedimento também foi avaliada. Deste modo, a presença de gás foi registrada em forma de **cortina de gás**, *blanking* ou **mascaramento acústico**, **turbidez acústica**, **pináculos acústicos** e **pluma intra-sedimentar**. Na tabela 1 estas assinaturas acústicas estão caracterizadas sumariamente bem como a variação das mesmas em relação à disseminação do gás.

Tabela 1. Respostas acústicas características da presença de gás na área estudada.

Table 1. Acoustic response characteristic of gas presence in the studied area.

Nomenclatura das formas de gás	Exemplos	Nível de disseminação do gás	Características principais
Cortinas de gás/ Bolsões de gás		Baixo	<ul style="list-style-type: none"> - Morfologia bem definida (em caixas) - Mascara refletores abaixo do topo
Blanking acústico/ Blanket/ Mascaramento acústico		Alto	<ul style="list-style-type: none"> - Forte reflexão no topo - Não é possível identificar refletores abaixo do topo - Limites laterais são difusos
Zona de turbidez acústica		Moderado a alto	<ul style="list-style-type: none"> - Refletor de topo é irregular e menos pronunciado - É possível identificar refletores abaixo do topo
Pináculos de turbidez		Baixo a moderado	<ul style="list-style-type: none"> - Frente de gás em formato de tenda - Altura não ultrapassa 2 m dentro do sedimento
Pluma intra-sedimentar		Baixo a moderado	<ul style="list-style-type: none"> - Refletor parabólico que passa através do sedimento - Pode estar conectado com um bolsão de gás

A **cortina de gás**, também identificada como bolsão de gás por alguns autores (Papatheodorou *et al.*, 1993; Weschenfelder *et al.*, 2016), apresenta morfologia bem definida na forma de “caixas” de anomalias sísmicas. O topo normalmente apresenta conformação levemente horizontal e as terminações laterais são abruptas podendo apresentar forma convexa. Abaixo dos refletores de topo, a resposta acústica é normalmente caótica, mascarando as estruturas sedimentares (Weschenfelder *et al.*, 2006; 2014) e impedindo estabelecer conexão com a fonte de gás. Sua dimensão lateral varia de poucos metros a quilômetros e é comum a interrupção repentina do refletor de topo, formando janelas acústicas.

As cortinas estão relacionadas com o gás pouco disseminado e sua morfologia deve-se a esta maior concentração de gás em uma dada camada. Estes bolsões estão presentes em quase toda área estudada apresentando uma extensão lateral variando entre 650 m e 9600 m aproximadamente. O limite superior dos bolsões dentro da camada de sedimento variou entre 6,5 m e aproximadamente 14,5 m em bolsões mais profundos. A morfologia mais comum, em “caixas” contínuas com terminações mais arredondadas esteve presente em praticamente todos os perfis em que os bolsões ocorreram, no entanto em alguns registros o início ou fim das manifestações apresentaram caráter irregular, na forma de pequenos bolsões em forma de “U” invertido.

Na figura 2 é possível observar cortinas de gás em ambos os perfis 1936 (A) e 5114 (B), no entanto, é notável a diferença na morfologia. No segmento A, de ~ 17,8 km de comprimento, a cortina inicia de modo discreto, não sendo possível identificar o ponto exato do seu início. Entretanto, a frente do gás é bem delineada e a terminação lateral bem definida e levemente arredonda. A continuidade da feição é interrompida produzindo um pequeno bolsão entre dois bolsões maiores. A frente da cortina está em média a 8,2 m abaixo do fundo marinho e a extensão da maior manifestação é de 9650 m. Em B, onde o perfil chega a ~ 5900 m de extensão, as cortinas acústicas inicialmente são mais numerosas, com a frente do gás bem marcada e extremidades laterais quase retilíneas. O topo de cada feição está a 11,2 m de profundidade no sedimento e é praticamente constante, bem como a extensão lateral de aproximadamente 630 m de cada bolsão. No final deste segmento, um bolsão contínuo, de terminação mais arredondada e limite superior mais irregular é formado. Apesar da maior extensão que chega a aprox. 3000 m, a profundidade da frente do gás é similar (8,8 m).

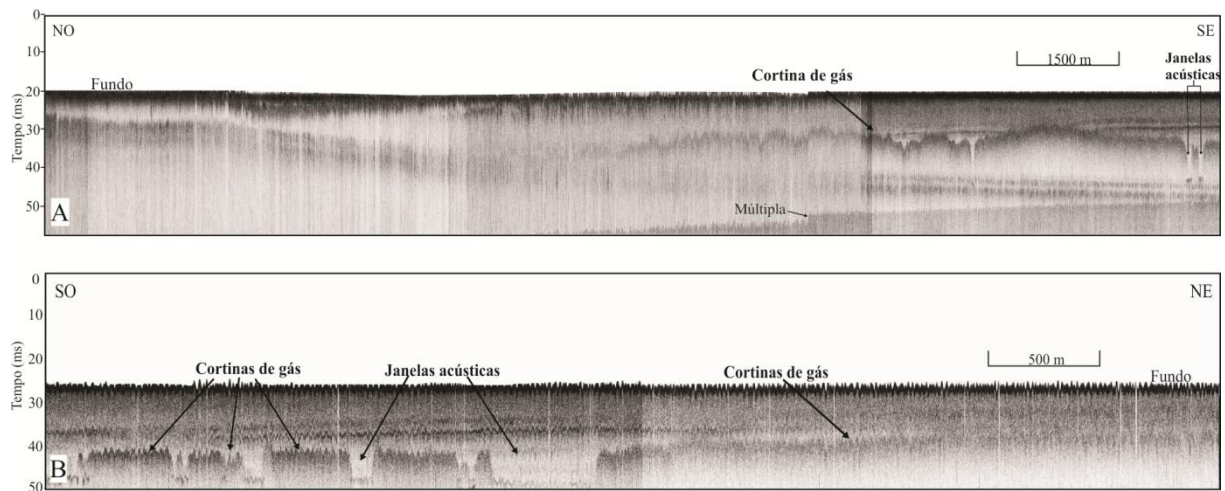


Figura 2. Representação de cortinas de gás em morfologias distintas. A) Morfologia mais curvilínea no perfil 1936; B) Morfologia mais retilínea no perfil 5114.

Figure 2. Representation of gas curtains in distinct morphologies. A) Morphology more curvilinear in profile 1936; B) Morphology more rectilinear in profile 5114.

O **blanking acústico**, assim como a cortina acústica, é caracterizado por uma forte e consistente reflexão de topo e um mascaramento dos refletores subjacentes. O topo é geralmente plano com limites laterais difusos. Esta feição pode ser reconhecida como *blanket* ou mascaramento acústico. O *blanking* acústico foi reconhecido em grande parte dos perfis, podendo estar relacionado com outras assinaturas sísmicas de gás como as cortinas acústicas, turbidez acústica, pináculos e pluma intra-sedimentar. Em alguns locais, sua extensão lateral atingiu mais de 30 quilômetros, abrangendo todo um perfil sísmico. Entretanto, na maioria das vezes em que está presente, o mascaramento encontra-se confinado entre 850 m e 20 km, podendo estar em gradação para outras formas de gás, conforme a sua concentração. Devido ao seu caráter bem disseminado, em diversos locais este tipo de manifestação chega próximo à superfície do fundo marinho entendendo-se verticalmente até o limite inferior do perfil.

Na figura 3 ocorre *blanking* em praticamente toda a extensão do perfil 0922 (15,5 km). Em alguns locais o mascaramento perde intensidade, mas seu limite superior é bem definido. Em alguns pontos o gás gera uma zona de turbidez acústica encobrendo parcialmente os refletores superficiais. Na porção mais final do perfil é possível observar pináculos e então uma extensa cortina acústica, cuja continuidade é interrompida com a formação de bolsões maiores para então formar um novo e extenso bolsão. A frente dos bolsões, assim como nos perfis anteriores, se encontra em uma profundidade média de 8,2 m no sedimento e a extensão lateral do maior bolsão no perfil é de 4 km. Ao longo do registro, é evidente a presença de vários paleocanais delineados pelos refletores sísmicos.

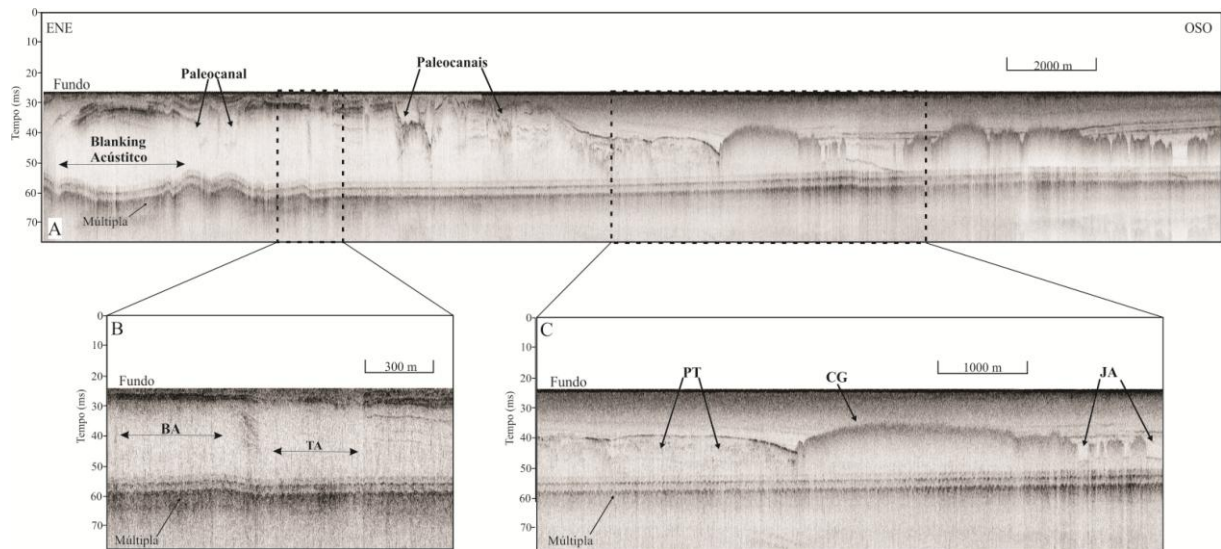


Figura 3. Perfil 1922; A) Variação das respostas acústicas detectadas pela presença de gás ao longo do perfil. B) *Blanking* Acústico (BA) e zona de Turbidez Acústica (TA); C) Cortinas de Gás (CG), Pináculos de Turbidez (PT) e Janelas Acústicas (JA).

Figure 3. Profile 0922; A) Variation of the acoustic response detected by the presence of gas along the profile; B) Acoustic Blanking (BA) and Acoustic Turbid zone (TA); C) Gas Curtain (GC), Turbidity Pinnacles (PT) and Acoustic Window (JA).

A **turbidez acústica** é uma forma de acumulação de gás caracterizada por um refletor de topo irregular e menos pronunciado do que as feições descritas anteriormente. Os refletores abaixo do topo não são totalmente encobertos, permitindo a identificação e mapeamento das estruturas sedimentares subjacentes (Judd & Hovland, 1992). As reflexões são caóticas, resultantes do espalhamento da energia acústica que gera uma mancha mais escura no registro (Davis, 1992).

A presença de turbidez acústica nos registros analisados ocorreu de forma menos frequente quando em comparação com a ocorrência de cortinas e *blanking*. Quando presente, a turbidez aparece associada ao mascaramento acústico, uma vez que apresenta aqui uma forma de disseminação moderada a alta do gás. O padrão mais turvo no perfil produzido pela turbidez ocorre sempre próximo à superfície do fundo marinho e dificilmente ultrapassa 1000 m de extensão horizontal.

Na figura 4, o perfil 4851 possui ~ 8,6 km de comprimento e nele é possível identificar uma zona de turbidez acústica onde em algum ponto é possível reconhecer um refletor em mergulho abaixo do topo. Esta turbidez se dá de forma bem disseminada, não sendo possível reconhecer seus limites laterais. Onde presente, esta anomalia mascara toda a camada sedimentar a partir dos 3 m abaixo do fundo até a reflexão múltipla do fundo.

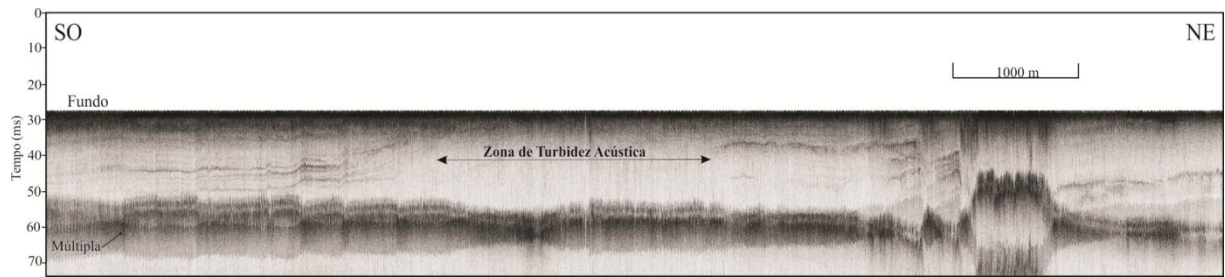


Figura 4. Representação de uma zona de turbidez acústica no perfil 4851.

Figure 4. Representation of an acoustic turbidity zone in profile 4851.

Os **pináculos acústicos** ou **pináculos de turbidez** são uma variedade de blanking e aparecem como uma frente em forma de “tenda” encobrindo completamente os refletores subjacentes (Iglesias & García-Gil 2007). Podem emergir verticalmente em dimensões que não ultrapassem 2 m de altura (Félix & Mahiques, 2013). Estes foram identificados nos registros sísmicos de maneira menos frequente em comparação as cortinas e *blanking*. Onde ocorrem, estão associados aos bolsões e ao mascaramento acústico, mostrando-se como um prolongamento do mesmo, o que torna difícil o reconhecimento da sua extensão total. Dentre as variadas respostas acústicas observadas ao longo dos 66 km do perfil 1059 (Fig. 5), é possível identificar pináculos que não ultrapassam 1,2 m de altura e associados ao *blanking*.

A identificação da **pluma intra-sedimentar** foi ainda menos ocorrente uma vez que aparece uma única vez nos perfis analisados. Esta feição pode ser caracterizada como um refletor parabólico que cruza refletores reais (Iglesias & García-Gil 2007). São semelhantes em formato com as plumas acústicas que ocorrem na coluna da água e podem estar relacionadas com pequenos bolsões de gás no sedimento (Félix & Mahiques, 2013). A pluma intra-sedimentar identificada está ligada a ocorrência de *blanking*, a partir do qual o gás extrapola a camada selante compondo a morfologia de pluma. Seu topo está a aproximadamente 3,2 m abaixo da superfície do fundo marinho, como exibido na figura 5.

Através do perfil 1059 (Fig. 5) ainda é possível descrever as feições que levam à formação dos pináculos de turbidez e pluma intra-sedimentar. No registro, há inicialmente um *blanking* de ampla extensão, levando à formação de uma zona de turbidez acústica. Tão logo formada a pluma intra-sedimentar e os pináculos, o mascaramento acústico perde intensidade e uma cortina acústica toma forma apresentando terminação lateral bem marcada e topo irregular. A profundidade da frente desta feição é de 9,5 m dentro da camada sedimentar com extensão horizontal máxima de ~ 9 km.

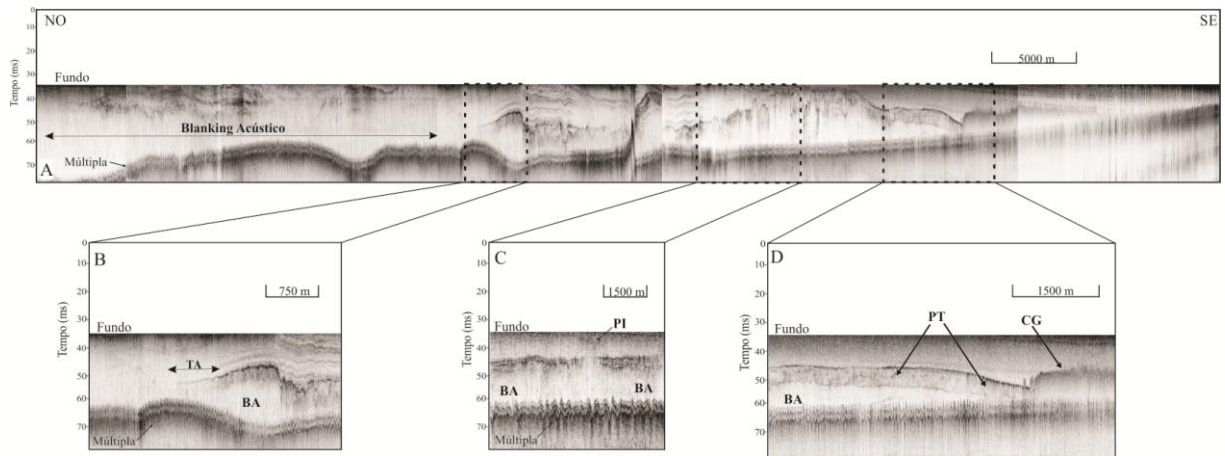


Figura 5. Profile 1059; A) Diferentes respostas acústicas ao longo da linha; B) *Blanking* Acústico (BA) e zona de Turbidez Acústica (TA); C) *Blanking* Acústico (BA) e Pluma Intra-sedimentar (PI); D) *Blanking* Acústico (BA), Cortinas de Gás (CG) e Pináculos de Turbidez (PT).

Figure 5. Profile 1059; A) Different acoustic responses along the line; B) Acoustic Blanking (BA) and Acoustic Turbid zone (TA); C) Acoustic Blanking (BA) and Intra-sedimentar Plume (PI); D) Acoustic Blanking (BA), Gas Curtain (CG) and Turbidity Pinnacles (PT).

Tendo em vista que tais respostas acústicas originadas pela presença de gás ocorreram em quase todos os perfis sísmicos analisados, um mapa de abrangência e localização de cada tipo de feição do mesmo foi criado, revelando a presença de gás em uma área de 585 km² (Fig. 6). Nota-se que além da grande área no centro do mapa, há uma pequena ocorrência de gás próximo ao início do canal de desembocadura do estuário da Lagoa dos Patos. De forma geral, é notável que as mesmas formas de manifestação do gás ocorrem em áreas próximas. Isto fica claro principalmente entre as ocorrências de cortinas de gás, entre as isóbatas de 10 m e 20 m, e entre os pináculos acústicos sobre a isóbata de 20 m.

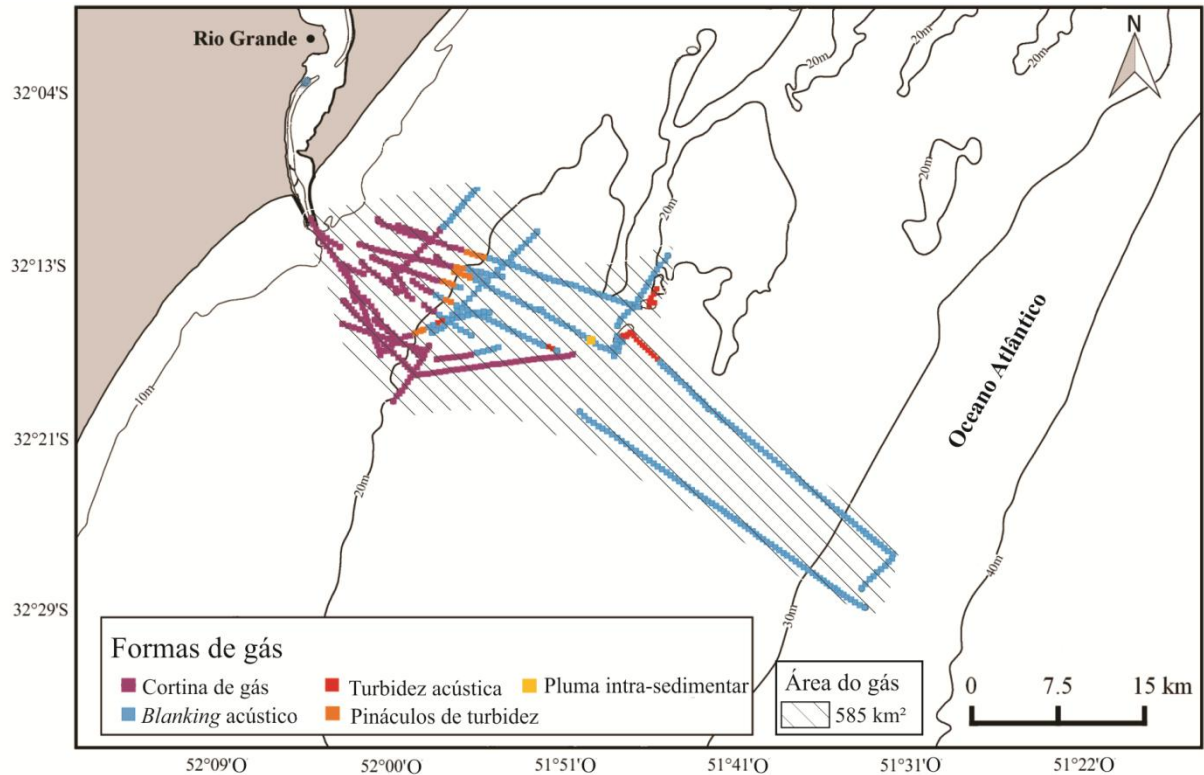


Figura 6. Distribuição das diferentes formas de gás e área de cobertura destas respostas acústicas.

Figure 6. Distribution of the different forms of gas and area of coverage of these acoustic responses.

4 Discussão

Os resultados obtidos neste estudo revelaram cinco formas de ocorrência de gás livre, sendo estas identificadas através do diferente comportamento e concentração do mesmo no sedimento. O termo “gás livre” denota o gás intersticial nos poros do sedimento, que não está em solução devido ao excesso de solubilidade limitada e a formação de bolhas (Schubel, 1974). Por estar em estado livre dentro do sedimento o fluido pode migrar através das camadas mascarando a estratificação apresentada nos ecogramas devido seu potencial de absorção e retroespalhamento da energia acústica. Estudos de bolhas de gás revelaram que a sua distribuição e o formato são muito dependentes do tipo de reservatório sedimentar (Robb *et al.*, 2006). Assim, de um modo geral, pode-se dizer que a distribuição das fácies afeta não somente a migração como os processos de geração, acumulação, e tipos de escape de gás do sedimento.

Devido ao seu pequeno tamanho molecular e a flutuabilidade em sedimentos e água, este tende a migrar para o leito oceânico por meio de falhas e fissuras (Judd, 2003). Não havendo estes meios para o movimento, o gás percola por meio dos poros do sedimento, logo, o tamanho da partícula é importante para tal deslocamento. Sills & Wheeler (1992) apontam que o movimento das bolhas de gás devido à flutuabilidade não será possível em sedimentos de grãos finos por causa da elevada força de capilaridade entre os poros. Os espaços vazios em argila, por exemplo, são pequenos e não permitem que o fluido migre, gerando uma vedação impermeável as bolhas (Diez *et al.*, 2007). A difusão só será possível neste tipo de sedimento se houverem microfissuras formadas durante a falha do mesmo (Boudreau *et al.*, 2005). Desta forma, se não houver possibilidade de migrar vertical ou lateralmente, o gás fica estocado assumindo uma morfologia característica e, existindo brechas ou diferenças no tamanho das partículas, o gás assume formas diversas.

A distribuição das cortinas de gás aqui encontrada indica que as fácies que recobrem tais acumulações agem como lâminas impermeáveis ou semipermeáveis que se comportam como selantes para bolhas em movimento ascendente, forçando um fluxo horizontal abaixo destas lâminas, o que explicaria a grande extensão lateral das cortinas mapeadas. Como observado nos perfis, este tipo de resposta acústica pode sofrer interrupções na sua extensão lateral, estando estas relacionadas à presença de camadas selantes e sendo reconhecidas como janelas acústicas. Essas janelas são consequências da mudança abrupta lateral de sedimentos carregados com gás e sedimentos livres dele (Costa & Figueiredo, 1998; Figueiredo *et al.*, 1996).

Assim como as cortinas, o blanking acústico é produzido por condições de confinamento de gás, onde o reservatório de fluido fica preso no sedimento durante sua migração ascendente (García-Gil, 2003). Sua morfologia é atribuída à presença de bolhas de gás aprisionadas produzidas pela decomposição de matéria orgânica (Acosta, 1984; Taylor, 1992). Estas bolhas absorvem a maior parte da energia acústica produzindo o encobrimento dos refletores tornando os reflexos fracos ou inexistentes. No entanto, o conteúdo de gás é insuficiente para formar uma característica mais forte de alta amplitude de reflexão superficial (Schubel, 1974).

Igualmente relacionado à camada selante estão os pináculos de turbidez encontrados, uma vez que tal feição ocorre devido a alterações nas laterais sobrejacentes de fácies de vedação que permitem que o gás possa migrar para áreas localizadas mais para cima (Iglesias & García-Gil, 2007). Verticalmente, este tipo de assinatura mostrou comportamento condizente com a literatura, como apresentado na figura 6. As plumas intra-sedimentares, segundo Iglesias & García-Gil (2007) estão muito provavelmente relacionadas com a

presença de pequenas quantidades de gás dentro do sedimento que não mascara completamente os refletores subjacentes.

A presença de turbidez acústica, como já descrito anteriormente, é uma perturbação de sinal pela presença de gás no sedimento em quantidades que apenas atenuam e difundem a energia sísmica, uma vez que com apenas 1% de gás presente no sedimento já é possível gerar uma zona de turbidez (Fannin, 1979). Contudo, o conteúdo de gás é insuficiente para formar uma característica mais forte de alta amplitude de reflexão superficial (Schubel, 1974).

As anomalias acústicas aqui descritas corroboram com trabalhos antecessores realizados na mesma região da plataforma do RS. Terra *et al.* (2014) documentaram através de um número menor de registros sísmicos de alta resolução, bolsões de gás de mesmo formato e extensão que os aqui apresentado. Assim como Abreu & Calliari (2005) encontraram, ao descrever a paleodrenagem, uma anomalia acústica que os autores reconheceram apenas como gás, podendo ser identificada como *blanking* acústico. Descrevendo as ocorrências de gás em locais do Brasil e do mundo, Weschenfelder *et al.* (2016), reconheceram na região principalmente cortinas de gás e ocorrências de reflexões anômalas caracterizadas por zonas de turbidez acústica.

Visto que o sedimento exerce papel fundamental no modo como as acumulações gasosas se apresentam, o mesmo é responsável pela sua origem e distribuição dentro dos estratos. A disponibilidade de material orgânico em várias profundidades, as vias para a migração de gás e estratos impermeáveis sobre sedimentos armazenadores permeáveis são as principais condições que controlam onde o gás se acumula em profundidades rasas no fundo do mar, bem como o tipo de gás que se acumula (Anderson & Bryant, 1990).

Sabe-se que há duas origens diferentes para o gás nos sedimentos, biogênica e termogênica (Floodgate & Judd, 1992). A primeira é derivada da transformação da matéria orgânica por um limitado grupo de bactérias anaeróbicas (*archeas*), principalmente em poucos metros de profundidade no sedimento marinho. O material, de fontes terrígenas e produção oceânica, é degradado pelos organismos formando metano. Devido à sua baixa densidade, a matéria orgânica se associa bem ao conteúdo de sedimento fino contido nos sedimentos depositados recentemente (Anderson & Bryant, 1990), assim, a relação entre ocorrência de gás metano e sedimentos finos é bastante comum. Uma rápida taxa de sedimentação pode levar ao soterramento, acúmulo e preservação deste gás abaixo daquela profundidade em que foi gerada. O gás termogênico é derivado de precursores orgânicos em alta temperatura e pressão e conseqüentemente em profundidades maiores de 1000 metros (Floodgate & Judd, 1992). Entretanto, pode migrar até a superfície através de fraturas.

A área encontrada onde o gás está distribuído está localizada bem em frente à desembocadura da Lagoa dos Patos, a qual pode ser considerada uma bacia de sedimentação para os sedimentos silítico-argilosos e matéria orgânica transportada através do estuário. No entanto, para poder estabelecer a origem do gás na plataforma interna do RS, é necessário compreender a evolução dela no que diz respeito ao aporte de matéria orgânica e às condições para soterramento e preservação da mesma. Em linhas gerais, as modificações climáticas foram responsáveis pela deposição de sedimentos nas planícies costeiras litorâneas e pela evolução paleoambiental (Meadenic e Corrêa, 2010).

Em parte do Quaternário tardio (últimos 400 ka), quatro sistemas de barreiras foram formadas na costa gaúcha em associação com quatro níveis de mar alto (Villwock e Tomazelli, 1995). A atual conformação da planície costeira e plataforma interna é resultado principalmente dos eventos transgressivos e regressivos deste período, onde estágios alternados de exposição e submersão da plataforma resultaram no retrabalhamento dos sedimentos e no desenvolvimento de ambientes deposicionais de acordo com as condições ambientais instaladas (Abreu & Calliari, 2005).

Durante o Último Máximo Glacial, quando o nível do mar estava a 130 m abaixo do atual (17,5 ka AP) (Martins, 1987), a plataforma continental ficou exposta e sujeita à erosão. O clima era árido e a precipitação era menor do que a atual (Quattrocchio *et al.*, 2008). Knox (1983) mostra que sob tais condições climáticas e queda na pluviosidade, a descarga fluvial aumenta devido à diminuição da cobertura vegetal e correspondente aumento da superfície de escoamento. Assim, perante este cenário, cursos fluviais estenderam-se em direção à borda da plataforma escavando a recém-formada planície costeira e transportando sedimentos terrígenos e matéria orgânica para a parte mais interna da bacia. Os materiais acumulados ao longo dessa linha de costa, normalmente formados de areias grossas, constituíram cordões litorâneos, enquanto que areias mais finas se depositavam sobre a plataforma interna da época, e areias lamosas e mesmo lamas se depositavam sobre a plataforma externa e talude (Corrêa *et al.*, 1996).

De fato, tal setor da plataforma está intimamente ligado com os vales incisivos formados durante os períodos de regressão marinha (Abreu & Calliari, 2005; Weschenfelder *et al.*, 2006; 2014). Estas feições entalhadas em forma de “v”, como apresentado na figura 3 indicam que a seção inferior do canal foi formada durante um período em que o nível do mar estava abaixo do nível do mar atual e desenvolvido dentro de um ambiente continental (Giagante *et al.*, 2011). Pequeno lagos e várzeas associadas a estes canais podem ter sido formados enriquecendo ainda mais o ambiente com detritos orgânicos.

Tão logo iniciada a transgressão holocênica em 17,5 ka AP, o nível do mar atingiu o seu máximo há 5 ka AP (Corrêa & Toldo Jr., 2002). Neste período a subida do nível do mar foi relativamente rápida (2cm/ano), intercalando com momentos de desaceleração (0,6 cm/ano) (Corrêa *et al.*, 1996). Os vales então constituídos por sedimentos fluviais foram afogados, proporcionando um grande espaço para acomodação e preenchimento por sedimentos marinhos transgressivos compostos pelas areias lamosas e lamas antes constituintes da plataforma externa.

Com o deslocamento das fácies marinhas em direção ao continente, estas soterraram o sedimento de fundo e preservaram a matéria orgânica ali depositada, permitindo a gênese do gás biogênico. Além disso, a velocidade de subida do nível do mar considerada rápida, também levou à preservação de toda sequência sedimentar (Davis & Clifton, 1987). Isto fortalece não só a ideia de que o gás encontrado seja biogênico como explica a associação do mesmo com feições de fundo, como baixos topográficos e paleocanais, demonstrado na figura 3. Tal associação é bastante comum, destacando-se em diversos pontos do globo (García-Gil *et al.*, 2015; Hill *et al.*; 1992; Lin *et al.*, 2010; Sun *et al.*, 2012; Weschenfelder *et al.*, 2005). O conhecimento a respeito de paleovales e sua associação com gás tende a ser ainda mais ampliado, uma vez que os depósitos de fundo gerados através de regressão marinha recobertos por sedimentos mais finos e possivelmente menos permeáveis compõem importantes reservatórios de hidrocarbonetos ou água (Zaitlin *et al.*, 1994).

Visto que a frente de gás encontra-se em profundidades rasas, podendo ser identificada a partir dos 3 m nos casos de turbidez acústica, entende-se que este esteja dentro de uma camada depositada recentemente, o pacote holocênico. Assim, o gás se encontra dentro dos depósitos transgressivos formados durante o último grande evento transgressivo (final do Pleistoceno) e de mar alto (Holoceno) e a camada vedante seria composta por sedimentos finos do trato de sistema transgressivo e de mar alto da sequência. Esta relação entre a gênese do gás e sua posição dentro do pacote sedimentar recente dá-se da mesma forma em muitos locais no mundo (por exemplo, Durán *et al.*, 2007; Jensen & Bennike, 2009; Weschenfelder *et al.*, 2016).

Na Lagoa dos Patos, adjacente à plataforma continental interna do RS, formada através das mesmas oscilações glacio-eustáticas do nível do mar sofridas pela zona costeira durante o período Quaternário, cortinas de gás, zonas de turbidez acústica e chaminés foram descritas em registros sísmicos de alta resolução (Vasconcellos, 2009; Weschenfelder *et al.*, 2006). A ocorrência destas feições acústicas rasas foi relacionada com uma textura granular sedimentar predominantemente fina depositada durante o Quaternário. Logo, foi proposto que as concentrações de gás podem ter se originado a partir da degradação da matéria orgânica

depositada nos paleoambientes desenvolvidos na Lagoa dos Patos e ambientes sedimentares associados. A presença de gás e seu período de formação na Lagoa dos Patos são análogos ao encontrado na plataforma, sugerindo a mesma época aproximada de formação nestes pontos e reforçando ainda mais a hipótese levantada neste estudo. Insira aqui o texto.

5 Conclusões

Através da sísmica de reflexão de alta resolução foi possível identificar cinco conformações diferentes de gás nos sedimentos marinhos na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul. As formas mapeadas foram cortinas de gás, blanking acústico, zonas de turbidez acústica, pináculos acústicos e pluma intra-sedimentar. Essas formas de ocorrências de gás e sua distribuição espacial são controladas pela natureza das facies sedimentares, porosidade e quantidade de gás dentro das camadas. As respostas acústicas encontradas neste trabalho são análogas às encontradas em diversos locais do mundo, o que contribuiu para a sua comparação e identificação. Do mesmo modo, acumulações de gás foram encontradas em trabalhos anteriores realizados na Lagoa dos Patos, local adjacente à plataforma e de mesma história geológica, sugerindo assim gênese similar.

Dado que o gás descrito encontra-se em menores profundidades, assim considerado raso, propõe-se que este esteja inserido em uma camada sedimentar depositada recentemente, a holocênica. Logo, as manifestações de gás aqui descritas encontram-se em depósitos transgressivos, formados a partir da subida do nível do mar a partir de 17,5 ka AP, os quais afogaram e preservaram sedimentos ricos em matéria orgânica. Estando esta matéria orgânica preservada e coexistindo condições geológicas propícias para formação, acúmulo e preservação de gás, pode-se explicar a atual existência destas ocorrências e a provável origem biogênica do mesmo na plataforma interna do RS.

Agradecimentos. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da Bolsa de Mestrado (Edital CAPES Ciência do Mar II nº 43/ 2013). Agradecemos também à Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e ao Laboratório de Oceanografia Geológica da FURG, pelo compartilhamento dos dados sísmicos. Este trabalho é parte da Dissertação de Mestrado da primeira autora junto ao Programa de Pós-graduação em Geociências da UFRGS.

Referências bibliográficas

Abreu, J.G.N. & Calliari, L.J. 2005. Paleocanais na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul: evidências de uma drenagem fluvial pretérita. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23 (2): 123-132.

- Acosta, J. 1984. Occurrence of acoustic masking in sediments in two sediments areas of the continental shelf of Spain: Ria de Muros (NW) and Gulf of Cadiz (SW). *Marine Geology*, 58: 427-434.
- Aliotta, S., Gisenberg, S.S., Giagante, D., Vecchi, L.G. & Salvatierra, M.M. 2014. Seismic stratigraphy of Pleistocene deltaic deposits in bahía blanca estuary, Argentina. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 86 (2): 649-662.
- Anderson, A.L. & Bryant, W.R. 1990. Gassy sediment occurrence and properties: Northern Gulf of Mexico. *Geo-Marine Letters*, 10: 209-220.
- Anka, Z., Berndt, C. & Gay, A. 2012. Hydrocarbon leakage through focused fluid systems in continental margins. *Marine Geology*, 332-334: 1-3.
- Boudreau, B.P., Algar, C., Johnson, B.D., Croudace, I., Reed, A., Furukawa, Y., Dorgan, K.M., Jumars, P.A. & Grader, A.S. 2005. Bubble growth and rise in soft sediments. *Geology*, 33: 517-520.
- Calliari, L.J. & Fachin, S. 1993. Laguna dos Patos. Influência nos depósitos lamíticos costeiros. *Pesquisas em Geociências*, 20(1): 57-89.
- Calliari, L.J., Tozzi, H.A.M. & Klein, A.H.F. 1998. Beach morphology and coastline erosion associated with storm surges in southern Brazil, Rio Grande to Chuí. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 70(2): 231-247.
- Claypool, G.E. & Kvenvolden, K.A. 1983. Methane and other hydrocarbon gases in marine sediment. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 11: 299-327.
- Corrêa, I.C.S. 1996. Les variations du niveau de la mer durant les derniers 17.500 ans BP. L'exemple de la plateforme continentale du Rio Grande do Sul- Bresil. *Marine Geology*, 130: 163-178.
- Corrêa, I.C.S. & Ade, A.B. 1987. Contribuição ao estudo da paleogeografia da plataforma continental do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 1, 1987, Porto Alegre. *Anais...*, Porto Alegre, p. 37-48.
- Corrêa, I.C.S. & Toldo Jr., E.E. 2002. Sea-level history since Last Glacial Maximum inferred from continental shelf morphology of southern Brazil. In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GEOLOGICAL CORRELATION PROGRAM (IGPC 464), 2, 2002, São Paulo and Cananéia. *Anais...*, São Paulo, p. 21-23.
- Corrêa, I.C.S., Martins, L.R.S., Ketzer, J.M.M., Elias, A.R.G. & Martins, R. 1996. Evolução sedimentológica e paleogeográfica na plataforma continental sul e sudeste do Brasil. *Notas Técnicas*, 9: 51-61.

- Costa, E.A. & Figueiredo Jr., A.G. 1998. Echo-character and sedimentary processes on the amazon continental shelf. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 70 (2): 87-200.
- Cukur, D., Krastel, S., Tomonaga, Y., Çagaty, M.N. & Meydan, A.F. 2013. Seismic evidence of shallow gas from Lake Van, eastern Turkey. *Marine and Petroleum Geology*, 48: 341-353.
- Davis, A.M. 1992. Shallow gas: an overview. *Continental Shelf Research*, 12: 1077-1079.
- Davis Jr., R.A. & Clifton, H.E. 1987. Sea-level change and the preservation potential of wave-dominated and tide-dominated coastal sequences. *In: Nummendal, D., Pilkey, O.H. & Howard, J.D (Eds.). Sea-level Fluctuation and Coastal Evolution. Tulsa, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 41, p. 167–178.*
- Diez, R., García-Gil, S., Durán, R. & Vilas F. 2007. Gas accumulations and their association with particle size distribution patterns in the Ría de Arousa seabed (Galicia, NW Spain): an application of discriminant analysis. *Geo-Marine Letters*, 27: 89–102.
- Dondurur, D., Çifçi, G., Drahnor, M.G. & Coskun, S. 2011. Acoustic evidence of shallow gas accumulations and active pockmarks in the İzmir Gulf, Aegean sea. *Marine and Petroleum Geology*, 28: 1505–1516.
- Durán, R., García-Gil, S., Diez, R. & Vilas, F. 2007. Stratigraphic framework of gas accumulations in the Ría de Pontevedra. *Geo-Marine Letters*, 27: 77–88.
- Fannin, N.G.T. 1979. The use of regional geological surveys in the North Sea and adjacent areas in the recognition of offshore hazards. *In: Ardu, D.A. (Ed.). Offshore Site Investigations. London, Graham and Trotman, p. 5-21.*
- Félix, C.A. & Mahiques, M.M. 2013. Late quaternary evolution and shallow gas formation in a tropical estuarine environment: the case of the Bertioiga channel, Brazil. *In: IEEE/OES ACOUSTICS IN UNDERWATER GEOSCIENCES SYMPOSIUM, 2013, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, p. 1-8.*
- Figueiredo Jr., A.G., Nittrouer, C.A. & Costa, E.A. 1996. Gas-charged sediments in the Amazon submarine delta. *Geo-Marine Letters*, 16: 31-35.
- Floodgate, G.D. & Judd, A.G. 1992. The origins of shallow gas. *Continental Shelf Research*, 12: 1145–1156.
- García-Gil, S. 2003. A natural laboratory for shallow gas: the Rías Baixas (NW Spain). *Geo-Marine Letters*, 23 (3–4): 215–229.
- García-Gil, S., García-García, A. & Vilas, F. 1999. Identificación sísmico-acústica de las diferentes formas de aparición de gas en la Ría de Vigo (NW, España). *Revista Sociedad Geológica de España*, 12 (2): 301–307.

- García-Gil, S., Vilas, F. & García-García, A. 2002. Shallow gas features in incised-valley fills (Ría de Vigo, NW Spain): a case study. *Continental Shelf Research*, 22: 2303–2315.
- García-Gil, S., Cartelle, V., De Blas, E., De Carlos, A., Diez, R., Durán, R., Ferrín, A., García-Moreiras, I., García-García, A., Igeas, J., Martínez-Carreño, N., Muñoz Sobrino, C. & Ramírez-Pérez, A. 2015. Gas somero en el margen continental Ibérico. *Boletín Geológico y Minero*, 126 (2-3): 575-608.
- Giagante, D.A., Aliotta, S., Ginsberg, S.S., Vecchi, L.G. & Spagnuolo, J.O. 2011. Evolution of a coastal alluvial deposit in response to the last Quaternary marine transgression, Bahía Blanca estuary, Argentina. *Quaternary Research*, 75: 614-623.
- Hagen, R.A. & Vogt, P.R. 1999. Seasonal variability of shallow biogenic gas in Chesapeake Bay. *Marine Geology*, 158: 75–88.
- Hill, J.M., Halka, J.P., Conkwright, R., Koczot, K. & Coleman, S. 1992. Distribution and effects of shallow gas on bulk estuarine sediments properties. *Continental Shelf Research*, 12: 1219-1229.
- Iglesias, J. & García-Gil, S. 2007. High-resolution mapping of shallow gas accumulations and gas seeps in San Simon Bay (Ría de Vigo, NW Spain). Some quantitative data. *Geo-Marine Letters*, 27: 103-114.
- Jensen, J.B. & Bennike, O. 2009. Geological setting as background for methane distribution in Holocene mud deposits, Årthur Bay, Denmark. *Continental Shelf Research*, 29: 775–784.
- Jones, E.J.W. 1999. *Marine Geophysics*. Chichester, Wiley & Sons, 520 p.
- Judd, A.G. 2003. The global importance and context of methane escape from the seabed. *Geo-Marine Letters*, 23: 147-154.
- Judd, A.G. & Hovland, M. 1992. The evidence of shallow gas in marine sediments. *Continental Shelf Research*, 12:1081–1095.
- Judd, A.G. & Hovland, M. 2007. *Seabed Fluid Flow, the Impact on Geology, Biology and the Marine Environment*. Cambridge, Cambridge University Press, 475 pp.
- Klein, A.H.F., Demarco, L.F.W., Guesser, V., Flemming, G.R., Bonetti, J., Porpilho, D., Ayres Neto, A., Souza, J.A.G. & Félix, C.A. 2016. Shallow gas seismic structures: forms and distribution on Santa Catarina Island, Southern Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 64(4): 83-95.
- Knox, J.C. 1983. Responses of river systems to Holocene climates. In: Wright, H.E & Porter, S.C. (Eds.). *Late Quaternary environments in the United States, vol.2, the Holocene*. Minnesota, University of Minnesota Press, p. 26–41.

- Lin, C.M., Li, Y.L., Zhuo, H.C., Shurr, G.W., Ridgley, J.L., Zhang, Z.P. & Xue, T. 2010. Features and sealing mechanism of shallow biogenic gas in incised valley fills (the Qiantang River, eastern China): A case study. *Marine and Petroleum Geology*, 27: 909-922.
- Martens, C.S., Albert, D.B. & Alperin, M.J. 1998. Biogeochemical processes controlling methane in gassy coastal sediments- Part 1. A model coupling organic matter flux to gas production, oxidation and transport. *Continental Shelf Research*, 18: 1741-1770.
- Martins, L.R. 1987. Sedimentos quaternários da plataforma continental brasileira. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 1, 1987, Porto Alegre. *Anais...*, Porto Alegre, p. 11-21.
- Martins, L.R. & Corrêa, I.C.S. 1996. Morphology and Sedimentology of Southwest Atlantic Coastal Zone and Continental Shelf from Cabo Frio (Brazil) to Peninsula Valdes (Argentina). Porto Alegre, RS., Brasil. IOC—UNESCO / MCT / CPRM Publication, 20 maps and glossary, 74p.
- Martins, L.R., Urien, C.M. & Eichler, B.B. 1967. Distribuição dos sedimentos modernos da plataforma continental sul-brasileira e uruguaia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 21, 1967, Curitiba. *Anais...*Curitiba, p. 29-43.
- Medeanic, S. & Corrêa, I.C.S. 2010. Climatic changes in the coastal plain of the Rio Grande do Sul state in the Holocene: palynomorph evidences. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 5 (2): 287-297.
- Okyar, M. & Ediger, V. 1999. Seismic evidence of shallow gas in the sediment on the shelf off Trabzon, southeastern Black Sea. *Continental Shelf Research*, 19: 575-587.
- Oliveira, N. & Weschenfelder, J. 2015. Caracterização das acumulações de gás raso na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 15, 2015, Imbé e Tramandaí. *Anais...* Imbé/Tramandaí, p. 50–51.
- Papatheodorou, G., Hasiotis, T. & Ferentinos, G. 1993. Gas-charged sediments in the Aegean and Ionian Seas, Greece. *Marine Geology*, 112: 171-184.
- Park, S.C., Lee, K.W. & Song, Y.I. 1995. Acoustic characters and distribution pattern of modern fine-grained deposits in a tide-dominated coastal bay: Jinhae Bay, Southeast Korea. *Geo-Marine Letters*, 15: 77-84.
- Pinet, N., Duchesne, M., Lavoie, D., Bolduc, A. & Long, B. 2008. Surface and subsurface signatures of gás seepgae in the St. Lawrence Estuary (Canada): Significance to hydrocarbon exploration. *Marine and Petroleum Geology*, 25: 271-288.

- Quattrocchio, M.E., Borrromei, A.M., Deschamps, C.M., Grill, S.C. & Zavala, C.A. 2008. Landscape evolution and climate changes in the Late Pleistocene–Holocene, southern Pampa (Argentina): Evidence from palynology, mammals and sedimentology. *Quaternary International*, 181: 123–138.
- Robb, G.B.N., Leighton, T.G., Dix, J.K., Best, A.L., Humphrey, V.F. & White, P.R. 2006. Measuring bubble populations in gassy marine sediments: a review. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 28 (1): 60–68.
- Schubel, J.R. 1974. Gas bubbles and the acoustically impenetrable, or turbid, character of some estuarine sediments. In: Kaplan, I.R. (Ed.). *Natural Gases in Marine Sediments*. Nova York, Plenum, p. 275–298.
- Schubel, J.R. & Schiemer, E.W. 1972. The cause of the acoustically impenetrable, or turbid, character of Chesapeake Bay sediments. *Marine Geophysical Research*, 2: 61–71.
- Sills, G.C. & Wheeler, S.J. 1992. The significance of gas for offshore operations. *Continental Shelf Research*, 12:1239–1250.
- Sun, Q., Wu, S., Cartwright, J. & Dong, D. 2012. Shallow gas and focused fluid flow systems in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea. *Marine Geology*, 315: 1–14.
- Taylor, D.I. 1992. Nearshore shallow gas around the UK coast. *Continental Shelf Research*, 12: 1135–1144.
- Terra, L.C., Calliari, L.J. & Griep, G.H. 2014. Acumulações de gás nos sedimentos da plataforma continental interna do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 6, 2014, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre, p. 3.
- Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R. & Villwock, J.A. 2000. Late Quaternary geological history of Rio Grande do Sul coastal plain, Southern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3): 470–472.
- Tóth, Z., Spieß, V. & Jensen, J. 2014. Seismo-acoustic signatures of shallow free gas in the Bornholm Basin, Baltic Sea. *Continental Shelf Research*, 88: 228–239.
- Vasconcellos, V.E.B. 2009. *Mapeamento e caracterização das acumulações de gás raso na Lagoa dos Patos, Sul do Brasil - RS*. Porto Alegre, 117p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Villwock, J.A. & Tomazelli, L.J. 1995. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. *Notas Técnicas*, 8:1–45.

- Weschenfelder, J., Corrêa, I.C.S. & Aliotta, S. 2005. Elementos arquiteturais do substrato da Lagoa dos Patos revelados por sísmica de alta resolução. *Pesquisas em Geociências*, 32(2): 57-67.
- Weschenfelder, J., Corrêa, I.C.S., Aliotta, S., Pereira, C.M. & Vasconcellos, V.E.B. 2006. Shallow gas accumulation in sediments of the patos lagoon, southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 78 (3): 607-614.
- Weschenfelder, J., Baitelli, R., Corrêa, I.C.S., Bortolin, E.C. & Santos, C.B. 2014. Quaternary incised valleys in the southern Brazil coastal zone. *Journal of South American Earth Sciences*, 55: 83-93.
- Weschenfelder, J., Klein, A.H.F., Green, A.N., Aliotta, S., Mahiques, M.M., Neto, A.A., Terra, L.C., Corrêa, I.C.S., Calliari, L.J., Montoya, I., Ginsberg, S.S. & Griep, G.H. 2016. The control of palaeo-topography in the preservation of shallow gas accumulation: Examples from Brazil, Argentina and South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 172: 93-107.
- Zaitlin, B.A., Dalrymple, R.W. & Boyd, R. 1994. The stratigraphic organization of incised-valley systems associated with relative sea-level change. *In: Dalrymple, R.W., Boyd, R. & Zaitlin, B.A. (Eds.). Incised-valley Systems: Origin and Sedimentary Sequences.* Tulsa , Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 51, p. 45-60.

CAPÍTULO III – CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida através do estudo e análise de perfis sísmicos de alta resolução (3,5 kHz) coletados em cruzeiros do programa Amazônia Azul, entre os anos de 2009 e 2014. Os 65 registros sísmicos resultantes do trabalho de campo neste período possibilitaram observar e reconhecer refletores sismo-acústicos, os quais em muitos pontos da área de estudo apresentaram uma assinatura sísmica diferenciada. A partir destas observações preliminares foi possível identificar tais refletores como anomalias acústicas nos registros sísmicos indicativas da presença de gás.

Havendo gás em uma camada sedimentar, este pode estar em solução entre os poros no sedimento ou em forma livre. Quando a solubilidade do gás é excedida pela sua concentração, os poros de água intra-sedimentares podem tornar-se supersaturados em gás, formando gás livre, isto é, bolhas. Visto que estas bolhas são fortes dispersores de energia acústica, ocorre uma grande diferença de impedância acústica entre o gás livre e sedimento circundante. Assim, a presença do gás intersticial nos sedimentos pode assumir formas que são detectáveis aos perfiladores sísmicos.

Por meio de um estudo mais minucioso foi possível identificar cinco conformações diferentes de gás nos sedimentos marinhos na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul. As formas mapeadas foram cortinas de gás, *blanking* acústico, zonas de turbidez acústica, pináculos acústicos e pluma intra-sedimentar. Tais feições foram distinguidas através da sua morfologia, dimensão e assinatura sísmica, sendo encontradas isoladamente ou então relacionadas umas as outras.

A acumulação e mobilidade das bolhas de gás livre nos sedimentos marinhos bem como o processo de gênese do mesmo, são determinadas pela distribuição de fácies sedimentares. Assim, as diferentes morfologias em que as acumulações gasosas se apresentam resultam da porosidade dos sedimentos do reservatório, da permeabilidade da camada selante e da disposição do gás no interior dos poros do sedimento. Desta forma, se não houver possibilidade de migrar vertical ou lateralmente, o gás fica estocado assumindo uma morfologia característica e, existindo brechas ou diferenças no tamanho das partículas, o gás assume formas diversas.

As cortinas de gás, por exemplo, estão associadas a uma camada selante bastante eficiente, que impede o fluxo ascendente de gás, confinando-o e forçando-o a migrar lateralmente. Isto explica a grande extensão destas estruturas. As feições como *blanking* acústico e turbidez acústica, da mesma forma que as cortinas, estão

relacionadas com o confinamento de gás, no entanto este aparece como sendo mais disseminado devido ao menor potencial selante das fácies superiores. A pluma intra-sedimentar assim como os pináculos de turbidez encontrados ocorrem devido a alterações laterais nas fácies de vedação permitindo que o gás possa migrar para áreas localizadas mais para cima, sendo que a primeira atinge uma extensão vertical um pouco mais expressiva que os pináculos.

Sabe-se que os sedimentos finos agem como excelente camada vedante, dado que os espaços vazios entre as partículas são ínfimos, impedindo a passagem dos fluidos abaixo destas. Ainda, os mesmos finos estão associados à matéria orgânica, componente que quando combinado à ação de bactérias específicas (*archeas*) e a determinadas condições físico ambientais, pode gerar gás biogênico, sendo o metano o principal constituinte dele. Uma rápida taxa de sedimentação pode levar ao soterramento, acúmulo e preservação deste gás abaixo da profundidade em que foi gerada.

As respostas acústicas encontradas neste trabalho estão localizadas bem em frente à desembocadura da Lagoa dos Patos, e estão relacionadas aos sedimentos síltico-argilosos e matéria orgânica transportados através do estuário e depositados na área estudada. Além disso, estas respostas são análogas àquelas encontradas em diversos locais do mundo sob circunstâncias similares de sedimentação, o que contribuiu para a sua comparação e identificação. Entre estes variados locais, acumulações de gás foram encontradas na Lagoa dos Patos, local adjacente à plataforma e de mesma história geológica, sugerindo assim gênese similar.

Na plataforma interna do RS, a preservação das formas de gás está relacionada com o seu processo evolutivo ao longo do tempo. Esta área junto à planície costeira do RS foram moldadas por oscilações de nível do mar durante o Quaternário. Os quatro ciclos trans-regressivos deste período resultaram não só na formação dos quatro sistemas de laguna-barreira na planície costeira como em momentos de exposição e submersão da plataforma.

Durante o Último Máximo Glacial (17,5 ka AP), período em que o nível do mar esteve mais baixo (130 m de profundidade), a plataforma ficou exposta e a linha de costa foi deslocada em direção à bacia. Junto a isso, os cursos fluviais estenderam-se em direção à borda da plataforma escavando a recém-formada planície costeira e transportando sedimentos terrígenos e matéria orgânica para a parte mais interna da bacia. Também, pequenos lagos e várzeas associadas a estes canais podem ter sido formados enriquecendo ainda mais o ambiente com detritos orgânicos. Um

importante indício que marca estes períodos de regressão marinha são os vales incisivos presentes na plataforma.

Logo que foi iniciada a transgressão holocênica (17,5 ka AP), o nível do mar avançou rapidamente em direção ao continente e a plataforma assim como e os vales fluviais foram afogados. As fácies marinhas compostas de areias lamosas e lama se deslocaram em direção ao continente, soterrando o sedimento de fundo e preservando a matéria orgânica ali depositada, o que permitiu a gênese de gás biogênico.

Dado que o gás descrito encontra-se em menores profundidades, assim considerado raso, propõe-se que este esteja inserido em uma camada sedimentar depositada recentemente, a holocênica. Logo, as manifestações de gás aqui descritas encontram-se nos depósitos transgressivos formados durante o último grande evento transgressivo, no final do Pleistoceno, e de mar alto, no Holoceno. O soterramento dos sedimentos de fundo combinado a condições físico-geológicas para formação de gás e a existência de camadas vedantes, pode explicar a atual existência destas ocorrências e a provável origem biogênica do mesmo na plataforma interna do RS.

Devido a qualidade dos dados armazenados ser, de modo geral, muito boa, estes ainda podem contribuir futuramente para um melhor entendimento da formação e evolução da plataforma interna na porção de sub-superfície. Estudos de estratigrafia da região podem ser mais detalhados a partir destes dados, bem como o próprio estudo de gás, no tocante à variação espacial do mesmo dentro da camada sedimentar.

ANEXO I - Atestado de Submissão do artigo para a Revista Pesquisas em Geociências



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
Pesquisas em Geociências

Porto Alegre, 06 de fevereiro de 2017.

À Natacha de Oliveira & Jair Weschenfelder

Venho comunicar o recebimento do manuscrito listado, submetido para publicação em *Pesquisas em Geociências*, órgão de divulgação científica editado pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Agradeço a seleção de *Pesquisas em Geociências* para a publicação de sua contribuição.

Manuscrito 659 – Gás raso na plataforma continental do Rio Grande do Sul, sul do Brasil.
Autores: Natacha de Oliveira & Jair Weschenfelder.

Atenciosamente,

Prof. Dr. Paulo Alves de Souza - Editor Chefe

Pesquisas em Geociências
Instituto de Geociências - Departamento de Paleontologia e Estratigrafia
Av. Bento Gonçalves, n° 9500 - Bloco 1 - Prédio 43127
CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil.
Email: paulo.alves.souza@ufrgs.br

ANEXO II - Resumo apresentado no XV Congresso Brasileiro da Associação de Estudos do Quaternário 2015

CARACTERIZAÇÃO DAS ACUMULAÇÕES DE GÁS RASO NA PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DO RIO GRANDE DO SUL

Natacha de Oliveira¹ e Jair Weschenfelder^{1,2}

¹ Programa de Pós-Graduação em Geociências. ² Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica - Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

A ocorrência de gás raso em sedimentos costeiros marinhos, bem como a migração e o escape do mesmo ao ambiente subaquoso ou atmosférico, vêm sendo muito estudados, já que quando em abundância, pode representar um valioso recurso para a indústria de petróleo (Cukur *et al.*, 2013). A relevância do estudo deve-se também ao fato de que a presença de gás pode trazer importantes consequências tanto para as feições geológicas no fundo e sub-fundo marinho, como também para processos biológicos e para a composição química dos oceanos (Judd & Hovland, 2009). Sendo que o seu lançamento pode interferir no ambiente, este ainda pode ajudar a decifrar as mudanças climáticas do passado e entender as modificações do futuro (Anka *et al.*, 2012), sendo que já foi demonstrado a influência da temperatura da água no modo de ocorrência das estruturas gasosas e na sua liberação (Martínez-Carreño & García-Gil, 2013). O gás metano está relacionado à sedimentos finos e altas taxas de matéria orgânica. Havendo matéria orgânica, bactérias metanogênicas e altas taxas de sedimentação, há condições para se criar acumulações, uma vez que o novo sedimento acomodado soterra o metano. Tais acumulações e a migração do fluido podem assumir formas que são detectáveis aos perfiladores sísmicos. A causa do mascaramento do registro sísmico tem sido atribuída à presença de gás intersticial dentro dos sedimentos e em outros casos a detritos de conchas (Acosta, 1984), que absorvem toda energia irradiada pelos sensores mascarando o registro. Neste estudo foram observadas duas linhas sísmicas de alta resolução (3,5 kHz) coletadas no canal e proximidades da desembocadura da Lagoa dos Patos, ao sudeste do estado do Rio Grande do Sul. Nesses registros foram observadas zonas de turbidez acústica e bolsões de gás (Figura 1.A). Na linha L1, coletada no inverno de 2009, um segmento do perfil sísmico foi extraído onde a manifestação de gás é mais evidente. Esta porção apresenta 10 km de comprimento e uma camada sedimentar de ~24,8 metros de espessura abaixo de uma coluna de água de aproximadamente 14 metros. A zona de turbidez acústica no ponto em que sua espessura é máxima na coluna sedimentar inicia em ~12,8 metros abaixo do fundo marinho e esta mesma ocorrência de topo mais linear apresenta aproximadamente 6 km de largura, sendo antecedida e precedida por ocorrências menores e mais irregulares (Figura de comprimento onde a manifestação de gás em forma de turbidez acústica destacou-se mais. Assim como no primeiro segmento, a camada sedimentar atinge 24,8 metros de espessura abaixo de uma coluna de água de aproximadamente 14,2 metros. Nesta porção, os pontos de ocorrência de turbidez acústica demonstraram ser mais irregulares, e o ponto onde este tipo de manifestação atingiu maior espessura inicia em ~ 6,8 metros abaixo do fundo marinho, logo, esta manifestação gasosa é mais rasa do que a que ocorre no perfil anterior (Figura 1.C). Formas semelhantes a estas apresentadas aqui foram encontradas na Lagoa dos Patos por Weschenfelder *et al.* (2006), que mapearam cortinas de gás e zonas de turbidez acústica em diversos pontos da área estudada. Os autores observaram que os pontos de ocorrência de gás estavam em áreas de sedimento predominantemente fino depositado durante o Quaternário, sugerindo que as concentrações gasosas poderiam ter se originado a partir da degradação da matéria orgânica depositada nos paleoambientes

desenvolvidos na lagoa. As ocorrências de gás raso nos registros sísmicos de alta resolução aqui apresentadas estão em uma área moldada principalmente pelos eventos transgressivos e regressivos do Quaternário, onde estágios alternados de exposição e de submersão resultaram no retrabalhamento dos sedimentos e no desenvolvimento de ambientes deposicionais de acordo com as condições ambientais instaladas (Abreu & Calliari, 2005). Além disso, a plataforma continental rasa do RS, em frente à desembocadura da Lagoa dos Patos, pode ser considerada como uma bacia de sedimentação para matéria orgânica transportada através do estuário, setor intimamente ligado com os vales incisos formados durante os períodos de mar baixo (Weschenfelder *et al.*, 2006; Weschenfelder *et al.*, 2014). Ainda, o clima subtropical da costa sul do Brasil favorece o desenvolvimento de ambientes altamente produtivos em termos de material orgânico. Uma vez que sedimentos e matéria orgânica através do aporte lagunar adjacente e condições geológicas propícias para formação e acúmulo de gás coexistem, pode-se explicar a atual existência destes bolsões evidenciados pelas zonas de turbidez acústica e a provável origem biogênica do mesmo na plataforma interna do RS.

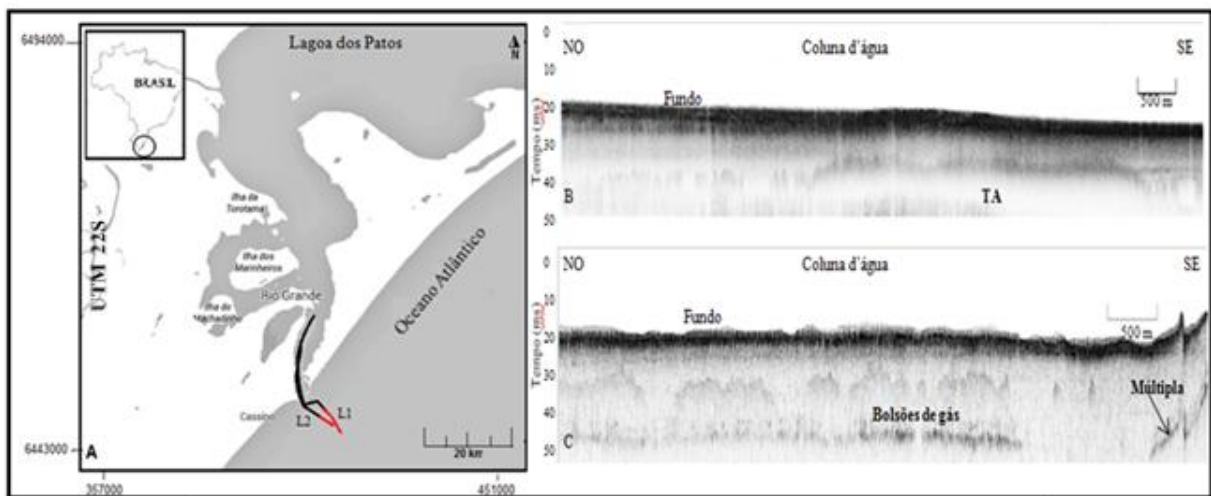


Figura 1. Localização das linhas sísmicas L1 e L2 e os respectivos segmentos analisados em vermelho (A); Representação das manifestações de gás em cada segmento, como a Turbidez Acústica, TA (B) e bolsões de gás (C).

Referências

- Abreu, J. & Calliari, L.J. 2005. Paleocanais na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul: evidências de uma drenagem fluvial pretérita. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(2): 123-132.
- Acosta, J., 1984. Occurrence of acoustic masking in sediments in two areas of the continental shelf of Spain: Ría de Muros-Noia (NW) and Gulf of Cádiz (SW). *Marine Geology*, 58(3): 427- 434.
- Anka, Z., Berndt, C. & Gay, A. 2012. Hydrocarbon leakage through focused fluid flow systems in continental margins. *Marine Geology*, 332: 1–3.
- Cukur, D., Krastel, S., Tomonaga, Y., Cagatay, M.N. & Meydan, A.F. 2013. Seismic evidence of shallow gas from Lake Van, eastern Turkey. *Marine and Petroleum Geology*, 48: 341 – 353.
- Judd, A. G. & Hovland, M.. 2009. *Seabed Fluid Flow: The impact on the Geology, Biology and Marine Environment*. New York, Cambridge University Press, 492p.
- Martínez-Carreño, N. & Garcia-Gil, S. 2013. The Holocene gas system of the Ría de Vigo (NW Spain): Factors controlling the location of gas accumulations, seeps and pockmarks. *Marine Geology*, 344: 82-100.

- Weschenfelder, J., Baitelli, R., Corrêa, I.C.S., Bortolin, E.C., Santos, C.B., 2014. Quaternary incised valleys in the southern Brazil coastal zone. *Journal of South American Earth Science*, 55: 83-93.
- Weschenfelder, J., Corrêa, I.C.S., Aliotta, S., Pereira, C.M., Vasconcellos, V.E.B., 2006. Shallow gas accumulation in sediments of the Patos Lagoon, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 78(3): 607-614.

ANEXO III - Resumo apresentado na 1ª Semana Acadêmica dos Pós-Graduandos do Instituto de Geociências da UFRGS 2015

DESCRIÇÃO DAS FORMAS DE OCORRÊNCIA DE GÁS RASO NA PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DO RIO GRANDE DO SUL

Natacha de Oliveira¹ e Jair Weschenfelder^{1,2}

¹Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, natoliveiran@gmail.com; ²Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica - Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, jair.weschenfelder@ufrgs.br

A ocorrência de gás raso em sedimentos costeiros marinhos, bem como a migração e o escape do mesmo ao ambiente subaquoso ou atmosférico, vêm sendo muito estudados, uma vez que este pode representar um importante recurso na indústria do petróleo e ainda influenciar todo o ambiente marinho. O principal gás presente nos ambientes subaquáticos é o metano, o qual está relacionado a sedimentos finos e altas taxas de matéria orgânica. Havendo matéria orgânica, bactérias metanogênicas e altas taxas de sedimentação, há condições para se criar acumulações, uma vez que o novo sedimento acomodado soterra o metano. Estas acumulações e a migração do fluido podem assumir formas que são detectáveis aos perfiladores sísmicos e que diferem de acordo com sua geometria, assinatura sísmica e dimensão. A causa do mascaramento do registro sísmico tem sido atribuída à presença de gás intersticial dentro dos sedimentos que absorvem toda energia irradiada pelos sensores mascarando o registro. Baseado na importância destes compostos, este estudo tem como objetivo descrever, através de sísmica de reflexão de alta resolução (3,5 kHz), a plataforma continental nas proximidades da desembocadura da Lagoa dos Patos, ao sudeste do Rio Grande do Sul, no que diz respeito à presença de hidrocarbonetos, a origem do fluido e período aproximado de geração associados à dinâmica geológica da plataforma. Com a finalidade de atender aos objetivos, foram analisados 65 perfis sísmicos coletados e cedidos pelo Laboratório de Oceanografia Geológica da FURG. Estas linhas foram analisadas através de softwares específicos para tratamento e análise das imagens sísmicas. Com isto, foi possível encontrar a localização das formas de gás e o modo como estas estão distribuídas na plataforma continental. Resultados preliminares apontam os bolsões de gás e zonas de turbidez acústica como sendo as principais formas de ocorrência na área estudada. Estas feições foram encontradas em grande parte dos perfis assumindo extensões e geometrias variadas. Considerando os numerosos processos de exposição e submersão da plataforma continental do Rio Grande do Sul durante o período Quaternário, entende-se que o ciclo sedimentar contribuiu para a formação, isolamento e, em alguns pontos, liberação do gás encontrado. Ainda, o clima subtropical da costa sul do Brasil favorece o desenvolvimento de ambientes altamente produtivos em termos de material orgânico. Uma vez que sedimentos e matéria orgânica através do aporte lagunar adjacente e condições geológicas propícias para formação e acúmulo de gás coexistem, pode-se explicar a existência de bolsões gasosos evidenciados por zonas de turbidez acústica e a provável origem biogênica do mesmo na plataforma interna do RS.

Palavras-chave: Gás raso; Sísmica de reflexão; Dinâmica geológica.