



O Uso da Sísmica de Reflexão nos Estudos de Geomorfologia Submarina em Fiordes, Chile

Seismic Reflection Use In The Submarine Geomorphologic Studies Of Fjords, Chile

Rosemary Vieira¹, Jefferson Cardia Simões¹ e José Francisco Araya-Vergara²

1. Núcleo de Pesquisas Antárticas e Climáticas, Depto. de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, rosemary.vieira@ufrgs.br/jefferson.simoese@ufrgs.br

2. Departamento de Geografia-Universidade do Chile

Resumo

Este trabalho apresenta resultados do uso da sísmica de reflexão sísmica em ambientes deposicionais glaciomarinhas da costa de fiordes norte e central do Chile. As geoformas são identificadas de acordo com as distintas respostas dos refletores acústicos, através do perfilador de subfundo 3.5 kHz. Facies sísmicas e movimentos de massa distribuídos ao longo dos fiordes de irregular morfologia submarina são classificados e interpretados em conjunto com modelos 3D da topografia submarina e subaérea, além de mapas de pendentes. Apesar de ser um importante instrumento para a reconstrução de paleoambientes glaciomarinhas, a sísmica de reflexão apresenta limitações quando não dispõe de amostras sedimentológicas *in situ*.

Palavras-chave: fiordes, reflexão sísmica, morfologia submarina, sedimentação glaciomarinha.

Abstract

This work presents the results of seismic reflection use on glaciomarine sedimentary environments in northern and central Chilean fjords coast. Landforms are identified according to distinct responses of acoustic reflectors, by 3.5 kHz subbottom profiler. Seismic facies and submarine mass movements along the very irregular fjord submarine morphology are identified and classified in combination with topographic 3D models and slopes maps. Although seismic reflection is an important tool to the glaciomarine environment reconstruction, this method still presents limitations when interpretations are made without having authenticating data such as drill cores.

Key words: fjords, seismic reflection, submarine morphology, glaciomarine sedimentation.

1. Introdução

Os ambientes de sedimentação glaciomarinhas se encontram entre os mais complexos sistemas deposicionais. Esses ambientes refletem mudanças acionadas por distintos controladores regionais e globais em diferentes escalas temporal e espacial (Powell e Alley, 1997).

Os fiordes possuem uma imensa capacidade de armazenar sedimentos devido à presença de "sills" (barreiras topográficas de origem rochosa ou morânica) em sua parte distal, que dão origem a bacias semifechadas, não permitindo, portanto, que

o sedimento se dirija ao mar. É estimado que, aproximadamente, um quarto de todo o sedimento terrígeno transportado ao oceano durante os últimos 100.000 anos, se encontra hoje nas bacias submarinas dos fiordes (Syvitski *et al.*, 1987). Portanto, registros da história glacial, com indicadores de mudanças climáticas, estão contidos em depósitos construídos sobre o fundo e vertentes submarinas de fiordes e das plataformas continentais. No entanto, a maioria das ferramentas e métodos usados no estudo do fundo marinho foi desenvolvida nos últimos 50 anos, e em fiordes, especialmente, a partir dos anos 80 (Syvitski, 1998). Estudos detalhados dos

processos glaciomarinhos e as características de suas geoformas principais somente começaram durante as últimas três décadas (Davies, 1997). Entre eles, há os estudos que integram sedimentologia glacial, geomorfologia e topografia/batimetria de fiordes com a dinâmica pretérita das geleiras (Colfaigh, 1997).

Métodos acústicos são os mais utilizados em pesquisas em ambientes glaciomarinhos; eles são fundamentais nos estudos da morfologia do fundo marinho, com o uso de ecosonda, assim como em pesquisas de camadas sedimentares rasas e profundas do subfundo marinho, com o uso de perfiladores de reflexão sísmica (Stoker *et al.* 1997). O método mais eficiente para identificar seqüências e geoformas glaciomarinhas é a sísmica de reflexão de alta resolução.

Este trabalho apresenta o emprego dos métodos de reflexão sísmica de alta resolução no estudo de ambientes deposicionais glaciomarinhos, enfatizando depocentros submarinos dos fiordes. Estudos efetuados na costa de fiordes do Chile são utilizados como exemplos, apontando suas vantagens e limitações.

2. Sedimentação glaciomarinha na costa de fiordes da Patagônia - Chile

Feições glaciomarinhas são aquelas formadas em ambientes marinhos próximos ou sob forte influência do gelo. Também são encontradas em zonas subaéreas expostas durante o período de rebaixamento do nível do mar, as quais foram submersas e influenciadas por processos marinhos (Syvitski, 1991; Dowdeswell *et al.* 1998). Os fiordes são um dos dois principais ambientes glaciomarinhos atualmente conhecidos; o outro ambiente, mais comum na Antártica, é caracterizado por grandes mantos de gelos aterrados ou flutuantes sobre a plataforma continental (Davies, 1997).

Fiordes são feições morfológicas em zonas costeiras montanhosas, resultado da intensa erosão glacial em antigos vales fluviais, e cujo retrocesso das geleiras permitiu a sua ocupação pelo mar (Post e Lachapelle, 2000). Fiordes são caracterizados pela presença de geleiras desprendentes no ambiente marinho (*calving glaciers*), ou de geleiras terrestres, cuja parte frontal está próxima de sua cabeceira (*outwash plain*) (Gilbert, 2000).

Na América do Sul, uma importante zona de fiordes se estende ao longo da costa sul chilena, desde 41° S a 55° S. A costa chilena entre essas latitudes se configura como uma extensa rede de mais de 200 fiordes e canais, com múltiplas geleiras que fluem dos Campos de Gelo Norte e Sul. Estudos realizados, desde 1995, pelos cruzeiros de investigação científica *CIMAR FIORDO* mostram ambientes extremamente sensíveis, devido à variedade de processos físicos associados a topografia variada. Os fiordes da costa

chilena geralmente possuem profundidades superiores a 400 m e barreiras topográficas submarinas na zona de confluência com outros canais ou com a plataforma continental (CONA, 1996, Araya-Vergara, 1997, 1998, 1999^a, 1999^b)

3. Dados Utilizados

Para o desenvolvimento dos trabalhos sobre os ambientes deposicionais glaciomarinhos na costa de fiordes da Patagônia, foram estudados os fiordes internos da costa norte e fiordes adjacentes ao *Campo de Hielo Sur Patagónico*, na costa da Patagônia central (Figura.1). Dois principais conjuntos de dados foram utilizados: (1) dados batimétricos de cartas náuticas produzidas pelo Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile SHOA, de escala 1:50.000 e atualizadas por cruzeiros de investigações entre 1997-2002; (2) registros acústicos através do perfilador de subfundo 3.5 kHz, obtidos pelos cruzeiros científicos CIMAR FIORDO e CAMPO DE HIELO SUR, organizados pelo Comité Oceanográfico Nacional e executados pelo Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

4. Metodologias Aplicadas na Análise Morfológica do Fundo Marinho

Análise dos registros de sistemas de reflexão sísmica em conjunto com os dados batimétricos são alguns dos métodos utilizados nas pesquisas em águas profundas dos fiordes, que permitem: (1) mapeamento e interpretação da topografia do fundo marinho; (2) mapeamento e análise da geometria dos sedimentos do fundo e subfundo marinho; (3) interpretação das condições e dos processos sedimentares, com mensurações morfométricas dos depósitos sedimentares.

4.1. Sistemas de Sísmica de Reflexão

Os métodos de sísmica de reflexão são os que dependem da geração e detecção de ondas acústicas. A fonte acústica gera um pulso (*shot*) que passa através da água e penetra no fundo marinho. A reflectância da energia se dá nas camadas limites sedimento/rocha de diferentes impedâncias acústicas, sua intensidade depende do contraste da impedância. A energia refletida é detectada por um hidrofone e processada eletronicamente provendo o raio de sinal/ruído (Stoker *et al.*, 1997). Escalas diferentes de resolução são possíveis de obter com as diferentes fontes acústicas água ou ar comprimido, pulsos elétricos de alta voltagem, pulsos eletrônicos que geram um espectro de frequências (Faugères *et al.*, 1997). A escolha do uso da fonte acústica depende principalmente do objetivo da pesquisa, consequentemente, a escolha da resolução e da penetração.

Sistemas sísmicos de resolução muito alta,

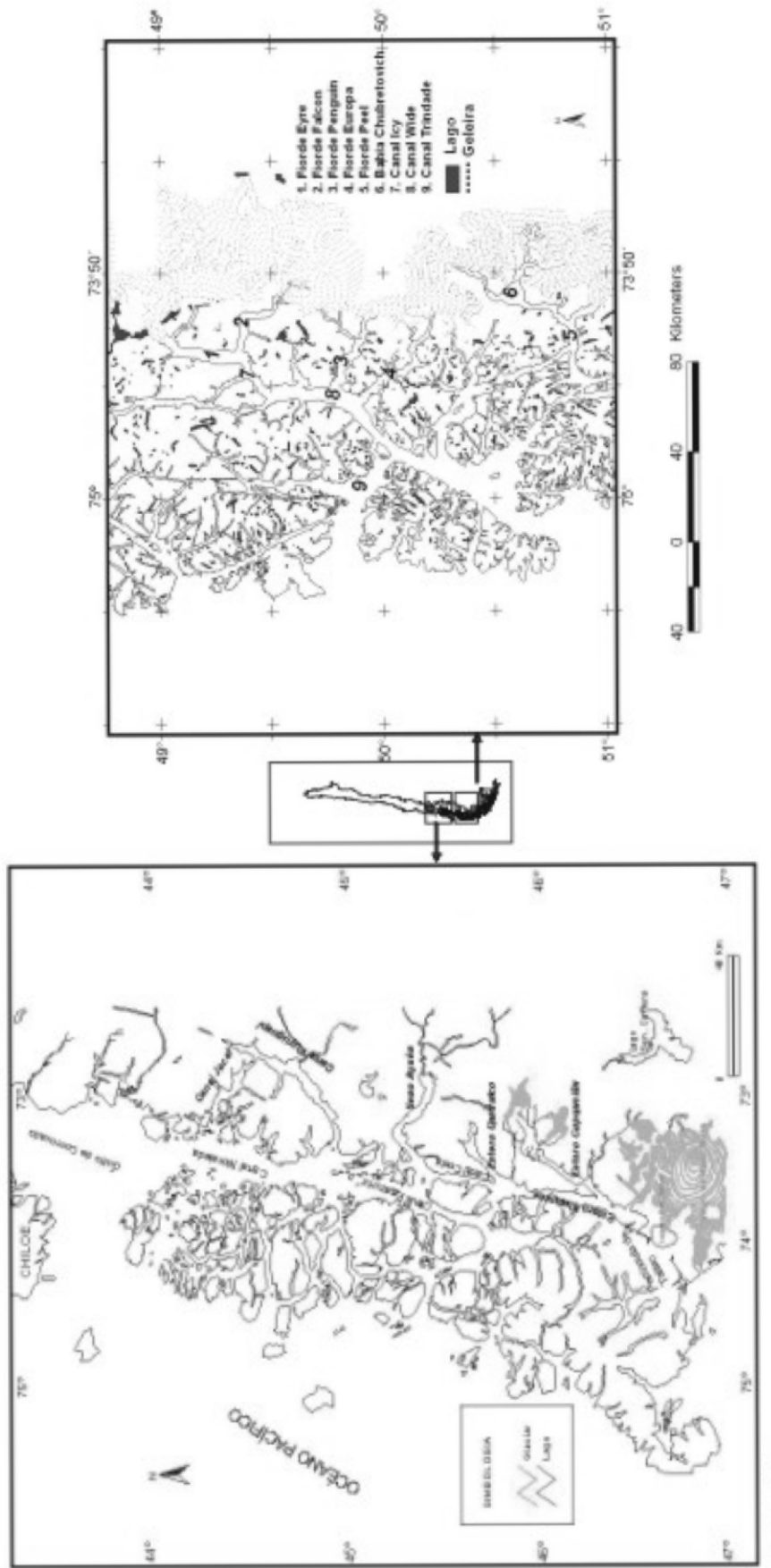


Figura 1. Localização das áreas de estudo. Costa de fiordes, Patagônia norte (Fig. 1a), e costa de fiordes da Patagônia central (Fig. 1b).

de baixa ou nenhuma penetração são utilizados para estudar ambientes modernos. As frequências muito altas usadas em perfiladores acústicos e sonares de varredura lateral (7.5 a 24 kHz e acima de 500 kHz, respectivamente) apresentam pouca ou quase nenhuma penetração no subfundo marinho, mas são extremamente úteis na identificação da morfologia superficial.

Sistemas sísmicos de alta resolução e de pouca penetração penetram nas camadas superiores, que podem alcançar dezenas de metros de sedimentos. Estes são amplamente aplicados, sendo o perfilador de subfundo 3.5 kHz o mais utilizado, pois pode ser usado para inferir a superfície morfológica, a natureza do sedimento e a geometria detalhada do ambiente de sedimentação mais moderno.

Sistemas de média resolução e de moderada penetração são aqueles que usam uma fonte elétrica (single-channel sparker), com um espectro de frequência entre 0.1 a 3 kHz. Estes têm uma penetração que varia de 100 m a 1 km e uma resolução entre 1 e 10 m.

Sistemas de baixa resolução e de alta penetração incluem canhões de ar (airguns), canhões de água (waterguns), com uma fonte acústica de baixa frequência, entre 10 e 100 Hz, e penetração de muitos quilômetros, mas com uma resolução muito baixa. Estes estão relacionados aos sistemas de multicanais e comumente aplicados com propósitos industriais, incluindo a sísmica em 3D.

No Chile, os cruzeiros científicos *CIMAR FIORDO* e *CAMPO DE HIELO SUR* produzem, desde 1995, centenas de quilômetros de registros do fundo e subfundo marinho através do perfilador de subfundo 3.5 kHz. Esse sistema permite a penetração de dezenas de metros nas camadas sedimentares, dependendo da natureza do sedimento, provendo dados para a interpretação da superfície rochosa e espessura das camadas sedimentares. Nesse sentido, apenas depósitos glaciogênicos mais recentes, ou seja, do Holoceno, podem ser analisados. Em contrapartida, a alta resolução e o elevado exagero vertical (entre 10 e 50) facilitam a identificação de diferentes depocentros e de atividades de vertentes submarinas ao longo dos fiordes, o que não é possível com os outros métodos.

As mensurações de profundidade, incluindo a espessura dos sedimentos, se basearam na velocidade média (assumida) do som no ambiente marinho (1500m/s). Os dados sísmicos não foram calibrados para velocidade real do som nos sedimentos.

Ao interpretar os registros do perfilador de subfundo em ambientes glaciomarinhos dos fiordes alguns parâmetros básicos da reflexão sísmica foram considerados, como o caráter da reflexão, a configuração dos refletores dentro das seqüências, e, finalmente, a forma externa das fácies ou das seqüências. Por exemplo, a identificação de refletores de configuração caótica é um importante indicador de ambiente deposicional glaciomarinho

indicador de ambiente deposicional glaciomarinho dominado por bancos morainicos, ou por depósitos de fluxos de detritos sobre as vertentes ou em sua base.

4.2. Integração dos Dados Geofísicos com os Dados Batimétricos

Os dados batimétricos vetorizados possibilitaram a elaboração de dois tipos de mapas: mapas batimétricos com isóbatas de 50 e 100 metros e mapas de pendentes. Com o uso de softwares foi possível interpolar as isóbatas, criar modelos 3D e perfis topográficos dos fiordes estudados, reproduzindo a morfologias subaérea e submarina. A integração dos conjuntos de dados, sísmicos e batimétricos, possibilitou a localização e a distribuição espacial no fundo marinho das principais fácies sísmicas associadas aos depocentros de origem glacial. Esses modelos mostram a localização e a inferência sobre a extensão de ambientes erosionais e deposicionais, e provêm um contexto regional para as interpretações das fácies sísmicas e das geoformas sedimentares.

5. Resultados obtidos

Interpretações dos ambientes deposicionais glaciomarinhos, desde a parte proximal até a distal dos fiordes chilenos, são parte dos principais resultados. Fácies acústicas foram classificadas, baseadas nos distintos refletores, sendo as duas principais as fácies massivas e as fácies estratificadas (Figura 2). Os perfis acústicos mostram refletores que puderam ser correlacionados entre os diversos fiordes. Na maioria dos fiordes, os refletores puderam ser claramente relacionados a depósitos de atividades de vertentes submarinas (fluxo de detritos ou avalanches e deslizamentos). Os refletores visíveis acusticamente estratificados, apresentam em sua maioria espessuras superiores a 20 metros. Os refletores caóticos foram relacionados a depósitos de fluxo de detritos e a depósitos morainicos.

Fiordes da costa norte (fiordes Puyuguapi, Aysén, Cupuelán, Quitalco, e canal Jacaf), que não são influenciados diretamente por geleiras (com exceção da cabeceira do fiorde Elefantes, onde a geleira San Rafael flui para a Laguna San Rafael), foram analisados quanto à morfogênese e à dinâmica das vertentes submarinas, onde foram observadas relações entre a estrutura de fundo das sub-bacias e a dinâmica das vertentes (Figura 3) (Vieira, 2001, 2002). As atividades de vertentes mais observadas incluem transportes como deslizamentos, *creep* (*creeping ou reptação*), e fluxo de detritos. Os ambientes observados que são mais propensos a essas atividades são: (i) onde a sedimentação ocorre sobre uma base topográfica marcada por vertentes (umbrais); (ii) áreas de falhas; (iii) proximidades

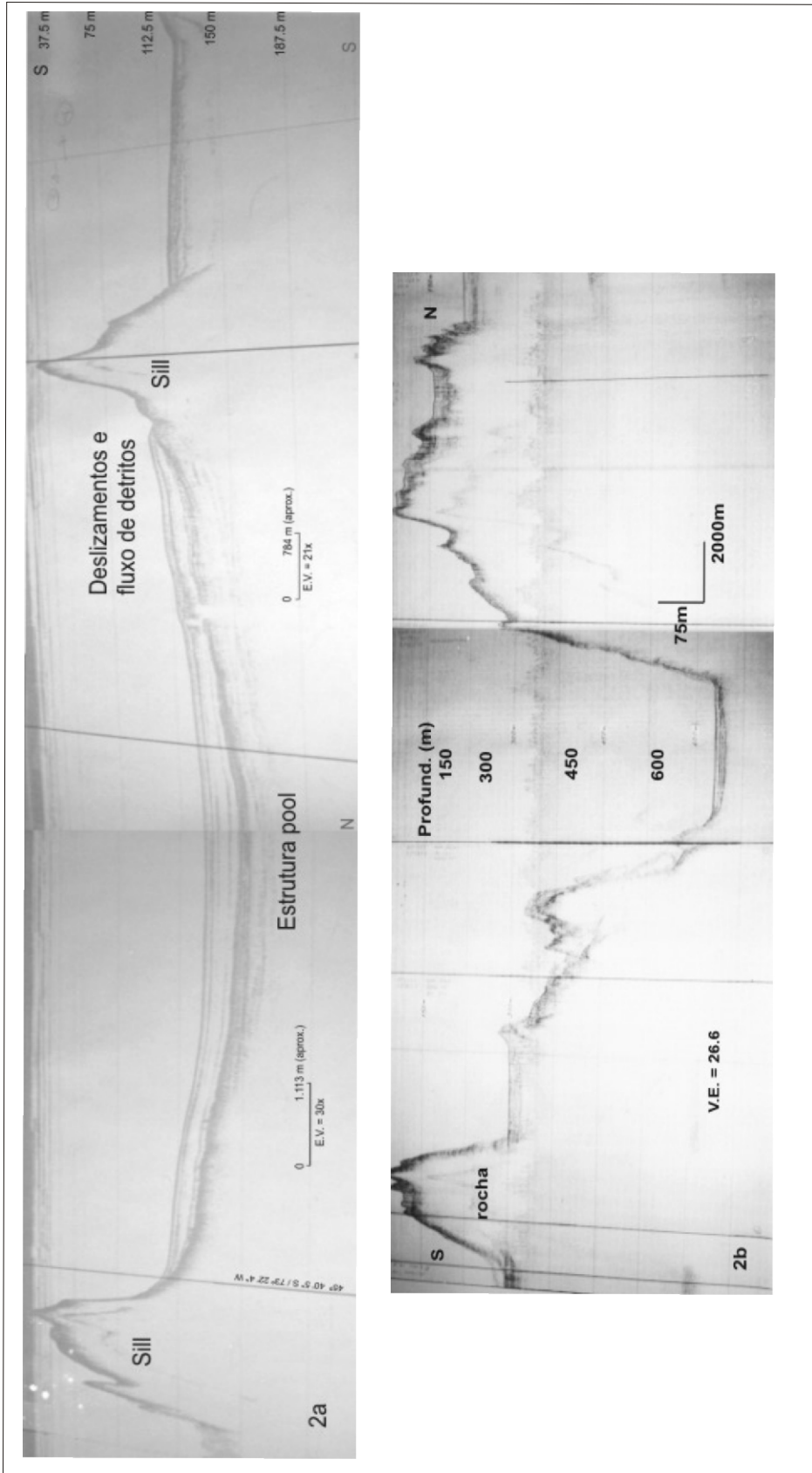


Figura 2. Perfis longitudinais do fiorde Quintralco (Patagônia Norte Fig. 2a) e do fiorde Peel (Patagônia central Fig. 2b). Fácies acústicas estratificadas no fiorde Quintralco, distribuída em um fundo de típica estrutura pool (fundo cônico delimitado por sill), contrasta com o Fjord Peel, cuja morfologia de fundo é irregular e com grandes variações de profundidades. São observadas respostas acústicas distintas referentes as facies massivas e estratificadas.

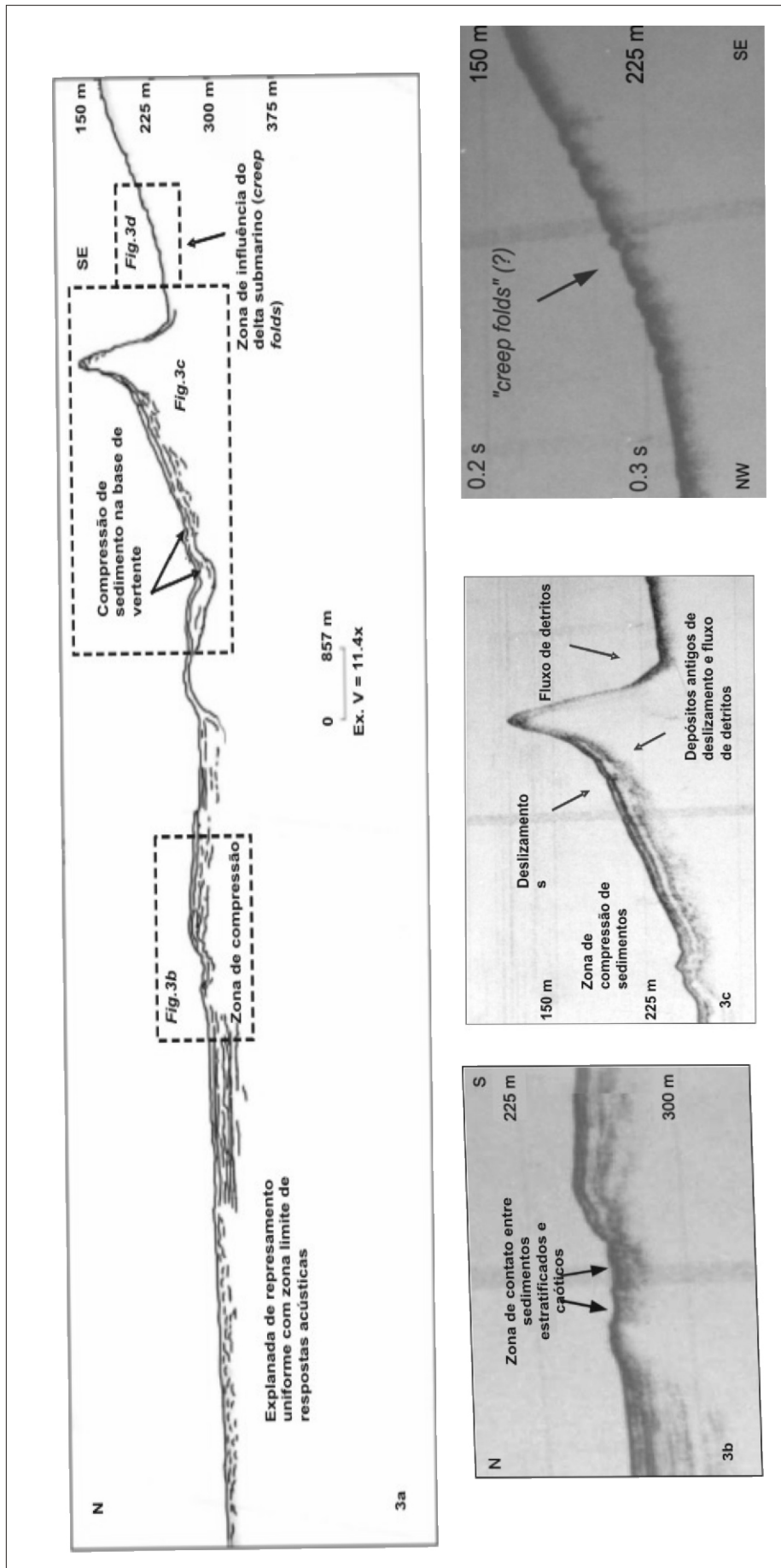


Figura 3: Fio de Puyuguapi, costa norte Patagônia. Movimentos de massa se reproduzem em vertentes com gradientes entre 1 8°. Acumulações caóticas internas servem como zonas de compressão para sedimentos superiores de caráter estratificado, que sofrem deformações em superfície e na subsuperfície, algumas em forma de cunha (3a). Na base da vertente uma depressão compressional se forma antes da acumulação de sedimento remodelado. Sobre o "sill" de origem rochosa se desprendem materiais que se acumulam na base das vertentes, formando uma zona de compressão de sedimentos (3b). Em direção à área do delta submarino notam-se formas suavemente dobradas (*creep folds*), concentradas na parte inferior da vertente, que se associam a movimentos de rastejamento (*creep*), que se desenvolvem em pendentes de 2° (3c).

de áreas com forte ou constante processo de sedimentação (deltas). As paredes laterais dos fiordes também são zonas suscetíveis aos movimentos de massa, como desprendimento de rochas e avalanches, no entanto, a área de estudo carece de perfis acústicos transversais, que abarcam estas partes dos fiordes.

Nestes fiordes, estruturas laminadas estão, em geral, associadas a blocos de deslizamento compacto, enquanto que estruturas não estratificadas e de configuração caótica a movimentos de materiais não coesos, como fluxos de detritos. Além disso, o caráter deslizante dos primeiros se vincula a deformação dos sedimentos não somente vertente abaixo, como também a deformação do fundo da subbacia. O movimento de material não coeso (desintegrativo) tem uma dinâmica e influência sobre os sedimentos de escala mais local, concentrando os depósitos deformados na base das vertentes. A

variação dos refletores acústicos dos depósitos junto às vertentes é o que possibilita verificar essas distintas associações.

Nos fiordes da costa central, diretamente influenciados por geleiras, (fiordes Falcon, Eyre, Europa, Penguin e Peel) a geometria dos depósitos sedimentares fornece informações do ambiente deposicional e das antigas posições terminais das geleiras durante o Holoceno. Depocentros desenvolvidos em antigas zonas de contato com a geleira foram identificados nas zonas proximais e centrais dos fiordes, como bancos morânicos e deltas submarinos (Figura 4). Espessas camadas de sedimentos estratificados foram localizadas nas zonas centrais e distais, indicando processos de sedimentação associados a icebergs e/ou correntes de turbidez. Atividades de vertentes nesta zona de fiordes estão provavelmente mais associadas ao comportamento das partes frontais das geleiras

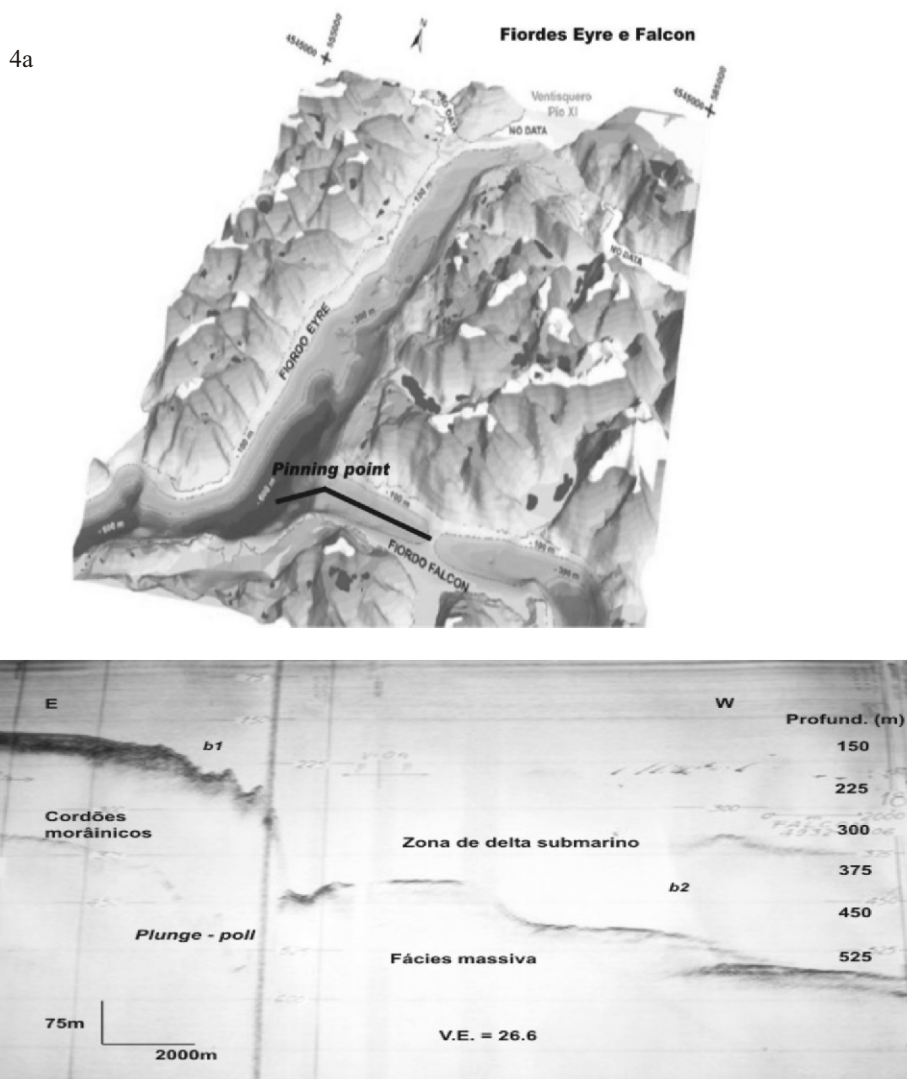


Figura 4. Perfil longitudinal da zona de confluência do fiorde Falcon com o fiorde Eyre, na Patagônia central (indicado pela linha azul na Fig. 4b). O ambiente submarino recente é influenciado diretamente por geleiras. Na figura 4a se observa uma zona deposicional proximal a uma antiga posição frontal da geleira, identificada pelas características acústicas destes depósitos sedimentares. Ao relacionar a localização destas geoformas com a morfologia do fiorde, pode-se associar a estabilidade da parte frontal da geleira com controladores morfológicos. Partes mais estreitas dos fiordes (*pinning points* Fig. 4b) propiciaram uma relativa estabilidade da geleira dentro de um contexto geral de retração dos gelos, característico do Holoceno. Essa estabilidade da frente do gelo gerou um ambiente ativo de sedimentação, incluindo atividades de vertentes.

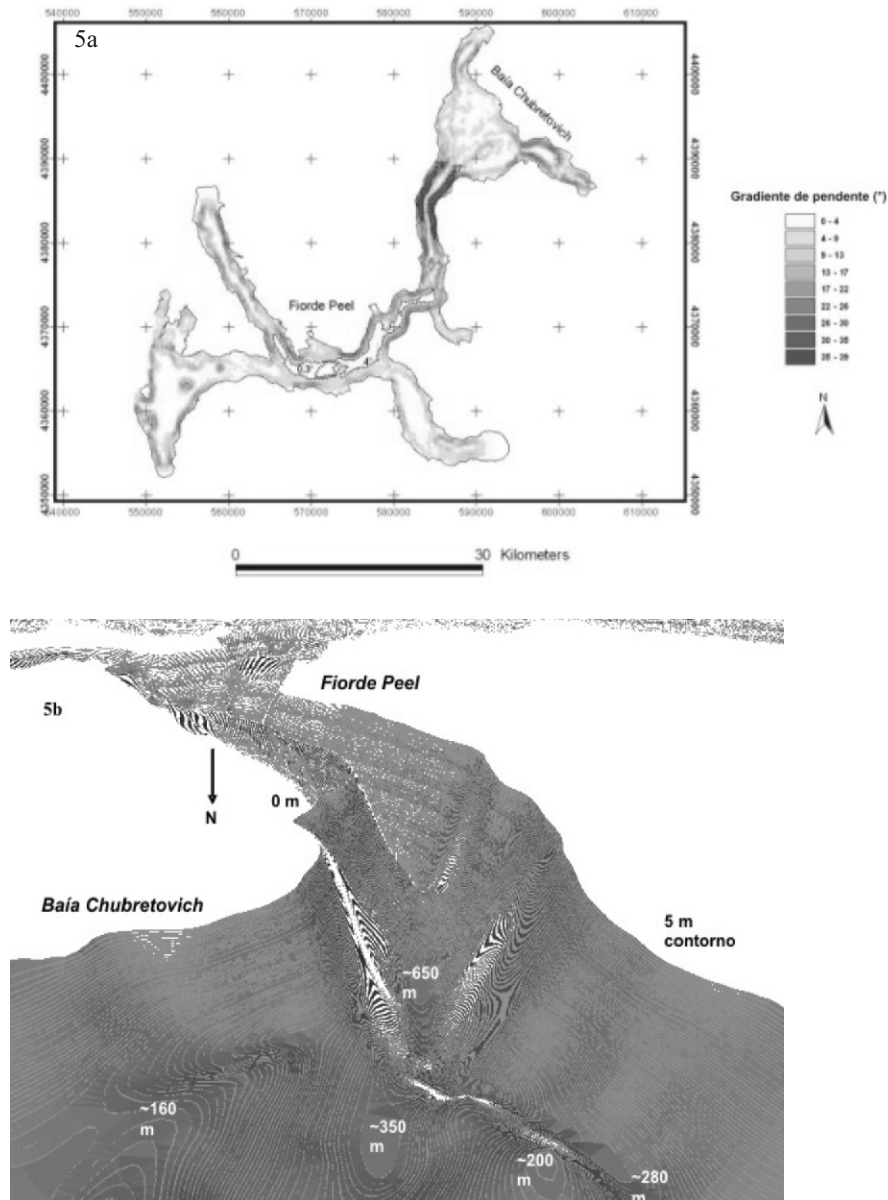


Figura 5. Mapa de pendentes submarinas no fiorde Peel, na Patagônia central. A área mais profunda do fiorde (quadro na figura 5a é representada em detalhe por um modelo 3D na figura 5b).

(avanço e retrocesso), diferentemente dos fiordes da costa norte, analisados anteriormente.

Comparando as diferentes morfologias do fundo marinho da costa norte e da costa central, se observam padrões distintos regionais entre os fiordes. Os fiordes da costa norte, que seguem as linhas regionais de falhas, apresentam uma típica estrutura “poll” (Syvitski, et al., 1987), ou seja, fundo côncavo, e com a presença de “sill” (barreira topográfica) na saída, ou na confluência com outro fiorde ou canal. Nos fiordes da costa central e nos canais, predomina a topografia de fundo irregular, com a presença de diversos “sills” ao longo do eixo longitudinal. Esses “sills” foram interpretados como sendo tanto de origem rochosa como morânico.

6. Discussão e Conclusão

Embora melhores imagens de sedimentos subsuperficiais rasos sejam obtidos por transdutores com frequências que variam entre 1.5-11.5 ou 0.4-8 kHz (SCAR, 2002), a frequência de 3.5 kHz utilizada pelo cruzeiro *CIMAR FIORDO*, em conjunto com a topografia submarina elaborada com dados batimétricos, possibilita visualizar a morfologia do fundo dos fiordes, além da interpretação e reconstrução parcial de flutuações glaciais. A localização dos principais depocentros glaciogênicos ao longo da topografia submarina irregular dos fiordes favorece a seleção de pontos para a coleta de testemunhos de sedimento, aumentando consideravelmente as informações e as interpretações sobre os processos atuantes nos ambientes glaciomarinheiros pretéritos e modernos.

Entretanto, a interpretação do ambiente glaciomarinho é problemática devido ao uso primário da reflexão sísmica. Mesmo sendo uma importante ferramenta na investigação submarina, ocorrem limitações quando as interpretações são feitas sem dados de testemunhos de sedimentos, que autenticam o ambiente sedimentar. As características sísmicas apresentadas pelo perfilador de subfundo neste trabalho representam apenas o eixo longitudinal dos fiordes, não tendo, portanto, a sua visão integral.

O grande desafio no aprofundamento dos estudos dos processos e geoformas submarinas em fiordes se relaciona às dificuldades de acesso e a visibilidade nesses ambientes, principalmente a grandes profundidades. Técnicas de amostragem *in situ* e mensurações integradas a métodos sísmicos em 3D, ainda se encontram em sua etapa inicial de aplicação e de aperfeiçoamento, como a utilização de SIG, que através de análises morfométricas, têm buscado estabelecer relações espaciais entre a dinâmica dos processos morfológicos submarinos e as suas geoformas resultantes.

Agradecimentos

Este trabalho é parte dos resultados obtidos na dissertação de mestrado, e na tese de doutorado em desenvolvimento, financiados pela Universidad de Chile e pela CAPES, respectivamente. Os registros sísmicos e as cartas batimétricas foram cedidos pelo Comité Oceanográfico Nacional e pelo Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

Referências Bibliográficas

- Araya-Vergara, J.F., (1997). Perfiles geomorfológicos de los fiordos y depresión longitudinal de Norpatagonia. *Cienc. Tecnol. Mar. Valparaíso*, 20: 3-22.
- Araya-Vergara, J.F., (1998). El problema genético de los fondos de los fiordos Norpatagónicos. *Invest. Mar. Valparaíso*, 26: 71-81.
- Araya-Vergara, J.F., (1999^a) Secuencia de formas deposicionales en la fractura del Canal Messier, Patagonia Central. *Invest. Mar., Valparaíso*, 27: 39-52.
- Araya-Vergara, J.F., (1999^b) Perfiles longitudinales de fiordos de Patagonia Central. *Cienc. Tecnol. Mar., Valparaíso*, 22: 3-29.
- Cofaigh, C.O., (1997). Geomorphic and sedimentary signatures of early Holocene deglaciation in High Arctic fjords, Ellesmere Island, Canadá: implications for deglacial ice dynamics and thermal regime. *Can. J. Earth Sci.*, 35: 437-452.
- Comité Oceanográfico Nacional, (1996). Crucero de Investigación Científica Marina a los Fiordos y Canales adyacentes a Campos de Hielo Sur. Informe de Crucero, 122 p.
- Davies, T.A., (1997). Significance of glaciomarine environments. in DAVIEW, T.A. et al (Eds.) *Glaciated Continental Margins: An Atlas of*

Acoustic Imagery, Chapman & Hall, London, 1 ed.: 1-6.

- Dowdeswell, J.A., ELVERHØI, A. & SPIELHAGEN, R., (1998). Glaciomarine sedimentary processes and facies on the Polar North Atlantic margins. *Quaternary Science Reviews*, 17: 243-272.
- Faugères, J.C., STOW, D.A.V. IMBERT P. & VIANA, A., (1999). Seismic features diagnostic of contourite drifts. *Marine Geology*, 162: 1-38.
- Gilbert, R., (2000). Environmental assessment from the sedimentary record of high-latitude fiords. *Geomorphology*, 32: 295-314.
- Prior, A. & LACHAPPELLE, E.R., (1999). Glacier Ice. University of Washington Press. 145 p.
- Powell, R.D. & ALLEY, R.B., (1997). Grounding-line systems: processes, glaciological inferences and the stratigraphic record. In *Geology and Seismic Stratigraphy of the Antarctic Margin, Part 2. Antarctic Research Series*, 71: 169-187.
- SCAR, Ad Hoc Group on marine acoustic technology and the environment, (2002). Impacts of marine acoustic technology on the Antarctic environment. Version 1.2, 62p.
- Stoker, M.S., PHEASANT J.B. & JOSEPHANS, H., (1997). Seismic Methods and Interpretation in DAVIEW, T.A. et al (Eds.) *Glaciated Continental Margins: An Atlas of Acoustic Imagery*, Chapman & Hall, London, 1 ed.: 9-26.
- Syvitski, J.P.M., BURREL, D.C. & SKER, J.M., (1987). FJORDS, Processes and Products. Springer-Verlag, New York, 379 p.
- Syvitski, J.P.M., (1991). Towards an understanding of sediment deposition on glaciated continental shelves. *Continental Shelf Research*, 11(8-10): 897-937.
- Syvitski, J.P.M., (1998). Understanding Sedimentary processes and paleoenvironments in fjords: a personal 25-year journey. Sedimentary Processes and Paleoenvironments in Fjords International Workshop at the University of Tromsø.
- Vieira, R., (2001). Morfogénesis y dinámica de las vertientes submarinas em la costa de fiordos de Norpatagonia, Chile. *Investigaciones Geográficas, Chile, Santiago*, 35: 101-124.
- Vieira, R., (2002). Morfogénesis y dinámica de las vertientes submarinas em la costa de fiordos de Norpatagonia, Chile. Tesis para optar al grado de Magister en Geografía. Universidad de Chile, Santiago, 101 p.