

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

**INTERPRETAÇÃO SISMOESTRATIGRÁFICA E
GEOMORFOLOGIA SÍSMICA DO CONE DE RIO GRANDE,
BACIA DE PELOTAS**

Luis Antonio Castillo López

ORIENTADOR - Prof. Dr. Farid Chemale Jr. – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hélio Jorge Portugal Severiano Ribeiro, UENF

Prof. Dr. Marco Antonio Botelho, UFBA

Prof. Dr. Eduardo Barbosa, UFRGS

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Ciências.

Porto Alegre – 2009

Castillo López, Luis Antonio

Interpretação sismoestratigráfica e geomorfologia sísmica do Cone de Rio Grande, Bacia de Pelotas./ Luis Antonio Castillo López. – Porto Alegre : IGEO/UFRGS, 2008.

[159 f.]. il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, RS - BR, 2008.

Orientação: Prof. Dr. Farid Chemale Jr.

1. Sismoestratigrafia. 2. Geomorfologia Sísmica. 3. Estrutural. 4. Modelagem 3D. 5. Cone de Rio Grande. I. Título.

Catálogo na Publicação
Biblioteca do Instituto de Geociências - UFRGS
Miriam Alves CRB Prov. 10/3108

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado a Thais, também a minha mãe Nelly, meus irmãos que também são partícipes desta etapa. A quem dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Universidade Federal de Rio Grande do Sul e, em especial, ao Instituto de Geociências e à área de concentração Estratigrafia onde foi possível realizar este trabalho, e receber parte do conhecimento adquirido durante a formação no curso de Doutorado na área de Estratigrafia, especialmente estratigrafia de seqüências, aplicando conceitos recentes de estratigrafia de seqüências e ferramentas modernas de tipo computacional. Além de isso, agradecer o apoio da Universidad Nacional de Colômbia pelo suporte econômico durante a estada no Brasil.

Em quanto a minha formação Profissional quero agradecer alguns professores que brindaram com seu conhecimento bem como aos meus colegas da Petrobras, especialmente Alexandre Castro, Celso Jardim, Bráulio, Sergio Cirino, pela sua contribuição no conhecimento do tema e os momentos compartilhados durante este processo de doutorado.

Quero agradecer ao Professor Dr. Farid Chemale pela sua receptividade e mente aberta em frente aos conhecimentos nas áreas de estrutural, estratigrafia e no modelamento geológico, importantes para conseguir os objetivos propostos para esta tese.

Agradeço a minha esposa, Thais, quem sempre me apoiou desde o começo, e também acreditou em mim, compartilhando os momentos difíceis durante este longo processo de elaboração da tese. Também a minha mãe Nelly e meus irmãos quem direto e indiretamente são participes desta etapa.

RESUMO

O Cone de Rio Grande constitui uma feição sedimentar, localizada na margem continental sudeste do Brasil, posicionada na porção *offshore* da Bacia de Pelotas e com grande potencial petrolífero. Esta feição geomorfológica caracteriza-se como um sistema profundo dominado por folhelhos e argilitos e presença subordinada de areia, formada no Mioceno ao Holoceno, com a geração de seus elementos estruturais, estratigráficos e geomorfológicos. A interação desses elementos pode-se obter por meio da interpretação e análises geofísicas (sismoestratigrafia).

A interpretação sismoestratigráfica de todos esses elementos, utilizada no presente trabalho, permitiu desenhar um modelo aproximado dos corpos geológicos encontrados no subsolo, os quais não podem ser mapeados com técnicas diretas, pelo que a prospecção e análises geofísicas foi fundamental para construir imagem das diferentes geoformas, utilizando as ferramentas geofísicas e computacionais neste estudo geológico.

A análise estrutural de dados permite indicar a grande influência e reativação de pelo menos três fases tectônicas: sistemas de falhamento normal, sistema inverso e falhamento transcorrente, posterior ao estágio da margem divergente da Bacia de Pelotas. Esta etapa é condicionada pela evolução da margem sudeste do Brasil, compreendendo um sistema isolado, que sugere que a tectônica no Cone tem sido controlada pela tectônica distensiva, com pulsos compressivos, devido a respostas da competência rochosa da geoforma, o aporte sedimentar, carregamento litostático e conseqüente subsidência sedimentar e tectônica.

A integração entre os dados geofísicos, estratigrafia de seqüências e a tectônica possibilitou o modelamento e a visualização do Cone de Rio Grande dando lugar a uma geoforma com alternância de controle estrutural, aporte sedimentar e a subsidência. Além disso, esta abordagem sobre modelagem e visualização do Cone de Rio Grande possibilitou estabelecer uma aproximação espacial de algumas feições geomorfológicas e modelamento do Cone de Rio Grande em 3-D.

ABSTRACT

Rio Grande Cone is located on southeast margin of the Atlantic Ocean, in the Pelotas Basin, comprising a large sedimentary feature located with oil potential. This geomorphology feature can be characterized like a depth system comprised by mudstone and shale presence with some sand contribution. From Miocene to Holocene were established structural, stratigraphy and geomorphology elements and their element interaction could be obtained from interpretation and geophysics analyses (Seismostratigraphy).

Sismostratigraphy interpretation developed in this work provides the necessary information to obtain an approximated model from a geological body located into subsurface, which can not be mapped with direct techniques. Different geoforms were acquired by means of images produced by the seismic prospection and geophysics analyses, comprising powered tools in geological study.

With the structural analyses was possible to determine the tectonic influence showing three tectonic phases: Normal system faults, reverse system and transcurrent faulting, after post rift Pelotas Basin that is associated to the evolution of the southeast Brazilian margin and comprised an isolated system that suggest that tectonic include the tensional and compressive pulses, due to geoforms character, lithostatic and rock competence and subsidence.

Geophysical integration with sequence stratigraphy and tectonic were very important to the modeling and visualization of the Rio Grande Cone like a geoform with alternance of tectonic control, sedimentary supply and eustasy. Also, this study about 3-D modeling and visualization of Rio Grande Cone permitted the spatial approximation of features located hundred of meters in subsurface.

ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho intitulado **Interpretação sísmo-estratigráfica e geomorfologia sísmica do Cone do Rio Grande, Bacia de Pelotas**, corresponde à tese de Doutorado, realizado na área de estratigrafia, com ênfase em estratigrafia de seqüências e sísmoestratigrafia, no Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, de Fevereiro de 2005 até Fevereiro de 2009. O suporte financeiro para a presença do autor no curso foi concedido pela Universidade Nacional de Colômbia, sede Bogotá (Colômbia), como parte da formação de professores. O suporte técnico para a Interpretação, modelagem e visualização, foram obtidos pela Schlumberger – Brasil, especialmente no software de interpretação e modelamento, Petrel, na sua versão 2008.1. A tese de Doutorado consiste de um sumário das seguintes contribuições de pesquisa, além de vídeos pertencentes às visualizações interativas obtidas das respectivas pesquisas (como anexos):

ARTIGO I. Integración de Reflectores Sísmoestratigráficos y Estratigrafía de Secuencias para Modelos Dos y Medio Dimensionales 2.5-D. 42 páginas. Artigo submetido à Revista Brasileira de Geofísica (RBGF, ISSN 0102-261X), apresenta como autores: Castillo, L. A.; Kazmierczak, de S. T.; Chemale, Jr.

ARTIGO II. Tectono Seismostratigraphic model of Rio Grande Cone – Brazil: Seismic sequences. 16 páginas. Artigo submetido à Revista Earth Sciences Journal Research (ISSN 1794-6190). Castillo, L. L. A¹; Kazmierczak, de S. T.²; and Chemale, Jr, F³.

ARTIGO III. Rio Grande Cone Stratigraphy Sequences, Structural Geology and Seismic Geomorphology. Artigo submetido à revista Journal of South American Earth Sciences (ISSN 0895-9811), autoria de: L.A. Castillo, F. Chemale Jr. and T. de S. Kazmierczak.

ARTIGO IV. Estratigrafía de Secuencias en un Modelo Dos y Medio Dimensional 2.5-D, del Cono de Rio Grande. 29 páginas. Artigo submetido à Revista de Geofísica do Instituto Pan-americano de Geografia e Historia (IPGH), apresenta como autores: Luis Antonio Castillo Lopez, Thais de Souza Kazmierczak e Farid Chemale Jr.

Este estudo foi conduzido pelo autor, durante a permanência no Brasil como parte da formação recebida como aluno de doutorado no curso de pós-graduação do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Porto Alegre. Modelamento e visualização tridimensional, onde os autores são responsáveis pelo controle de qualidade e seu conteúdo que conduziu a vários vídeos temáticos da análise estrutural, estratigrafia, geofísica e da geomorfologia.

A presente tese apresenta as seguintes partes principais:

a) Introdução sobre o tema e descrição do objeto da pesquisa de Doutorado, onde são sumarizados os objetivos e a filosofia de pesquisa desenvolvida e o estado da arte sobre o tema de pesquisa, seguidos de uma discussão integradora contendo os principais resultados e interpretações deles derivadas;

b) Artigos submetidos a periódicos internacionais com corpo editorial permanente e revisores independentes, escritos pelo autor durante o desenvolvimento do seu Doutorado;

c) Em apêndice, é apresentada uma serie de vídeos, que constituem parte dos resultados da tese, os quais por seu formato, dimensão e/ou natureza não pode ser incluída nos artigos, alias, fazem parte do trabalho da teses.

d) Anexos, compreendendo a documentação pertinente aos aceites da submissão dos quatro (4) artigos por parte dos editores chefes.

Sumário

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	9
1.1 Introdução.....	9
1.2 Objetivos.....	10
1.3 Área de estudo.....	10
1.4 Metodologia.....	12
1.4.1 Geofísica: Sísmica de reflexão.....	15
1.4.2 Análise estrutural.....	16
1.4.3 Estratigrafia de seqüências.....	19
1.4.4 Geomorfologia sísmica.....	20
1.4.5 Modelamento e visualização.....	21
1.5 Resultados obtidos.....	22
Referências.....	23
2 CORPO PRINCIPAL - ARTIGOS SUBMETIDOS.....	30
2.1 Artigo I. Integración de Reflectores Sismo estratigráficos y Estratigrafía de Secuencias para Modelos Dos y Medio dimensionales.....	31
2.2 Artigo II. Tectono Seismostratigraphic model of Rio Grande Cone – Brazil: Seismic sequences.....	65
2.3 Artigo III. Rio Grande Cone Stratigraphy Sequences, Structural Geology and Seismic Geomorphology.....	82
2.4 Artigo IV. Estratigrafía de Secuencias en un Modelo Dos y Medio Dimensional 2.5-D, del Cono de Rio Grande.....	126
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	155
3.1 Apêndice A. Visualizações interativas (vídeos).....	155
3.2 Anexo A. Aceitação Submissão dos Artigos aos editores.....	156

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

Os métodos sísmicos permitem um bom imageamento, modelamento e aproximação das feições e geoformas encontradas no subsolo. A geometria das rochas, até algumas décadas, era entendida a partir de um contexto bidimensional. Embora a resolução sísmica diminua com a profundidade, uma gama de elementos deposicionais pode ser imageado até o embasamento, a partir da análise da combinação de reflexão sísmica e atributos sísmicos. Modelamento de dados sismoestratigráficos pode ser feito com dados 2-D utilizando aproximações que permitem levar configurações a diferentes domínios, resultando em modelo e visualização de feições em forma tridimensional no domínio da profundidade ou temporal. Após a interpretação por meio de seções bidimensionais, o mais conveniente é fazer estudos mediante decomposição do sinal sísmico, (BROWN AND FISHER, 1980). Embora aproximações 2,5 dimensionais (quase3D ou q3D) podem permitir visualizações e modelos geológicos coerentes, estas têm sido utilizadas somente em etapas de processamento. As seções verticais estão restringidas ao plano, mas para sua extensão lateral devem ser supostos parâmetros adicionais (eventos fora do plano, fluxos, etc).

O estudo da estratigrafia a partir de dados sísmicos inicia-se com a aplicação dos princípios e técnicas geofísicas ao estudo estratigráfico (MITCHUM *et al.*, 1977; VAIL *et al.*, 1977). Onde sistemas deposicionais podem ser diretamente imageados, são obtidas predições mais precisas de litofacies relacionadas em tempo e espaço. Tal imagem direta da geologia resulta no refinamento do modelo deposicional, especialmente dentro do contexto da Estratigrafia de Sequências. Esta abordagem da sísmica é importante, pois é uma ferramenta que evolui constantemente, sendo um método eficaz que possibilita obter uma boa imagem do subsuperfície (seção geológica).

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste projeto é correlacionar e delimitar feições estruturais e estratigráficas da geomorfologia do Terciário ao Recente, a partir da informação sísmica em uma geoforma localizada em profundidade. No presente trabalho, uma bacia estratigráfica de margem passiva, Bacia de Pelotas, é trabalhada em um meio 2,5 D. para que se possa apresentar os aspectos geológicos e geofísicos que influenciam na sua formação estratigráfica e estrutural (diápiros, falhas e dobras). Entre os objetivos específicos podem ser citados:

a) Integrar ferramentas que facilitem a observação e o modelamento do ambiente geomorfológico do Cone de Rio Grande durante sua evolução sedimentar e seu significado tectonoestratigráfico.

b) Interpretar dados sísmicos 2-D utilizando atributos como resposta para a estratigrafia, estrutural e geomorfologia e assim desenvolver um modelo tridimensional tectonoestratigráfico e da geomorfologia sísmica do Cone de Rio Grande.

c) Adotar uma metodologia mediante o uso de imagens e a visualização tridimensional de diferentes aspectos geofísicos e geológicos.

1.3 Área de Estudo

A área de estudo compreende a feição conhecida como Cone de Rio Grande (CRG), localizada na Bacia de Pelotas (Fig. 1A; Quadrado projetado). Apresenta forma assimétrica sendo entendida para o extremo sudeste do Offshore da Bacia de Pelotas desde a plataforma até o talude e parte do sopé. Compreende pacotes sedimentares com progradações e alguma retrogradações, relacionados a eventos de aporte sedimentar do Mioceno até Holoceno,

com períodos de não deposição. Na plataforma, os sedimentos do CRG apresentam-se com pouca profundidade formando cunhas, que variam para pacotes, mas espessos na quebra de plataforma, dando lugar a clinofórmias de grande porte, onde podem ser visualizadas as seqüências progradantes.

Os sedimentos apresentados na plataforma são constituídos por materiais associados à história evolutiva do aporte sedimentar de antigos afluentes como o Jacui, Camaquã, Rio de la Plata, etc. (Figura 1B), aportes durante o Mioceno resultado de processos transgressivos e regressivos. Estes sedimentos apresentam em forma monótona na área do Cone, constituídos predominantemente por folhelhos e silte argiloso, com alguma presença de areias.

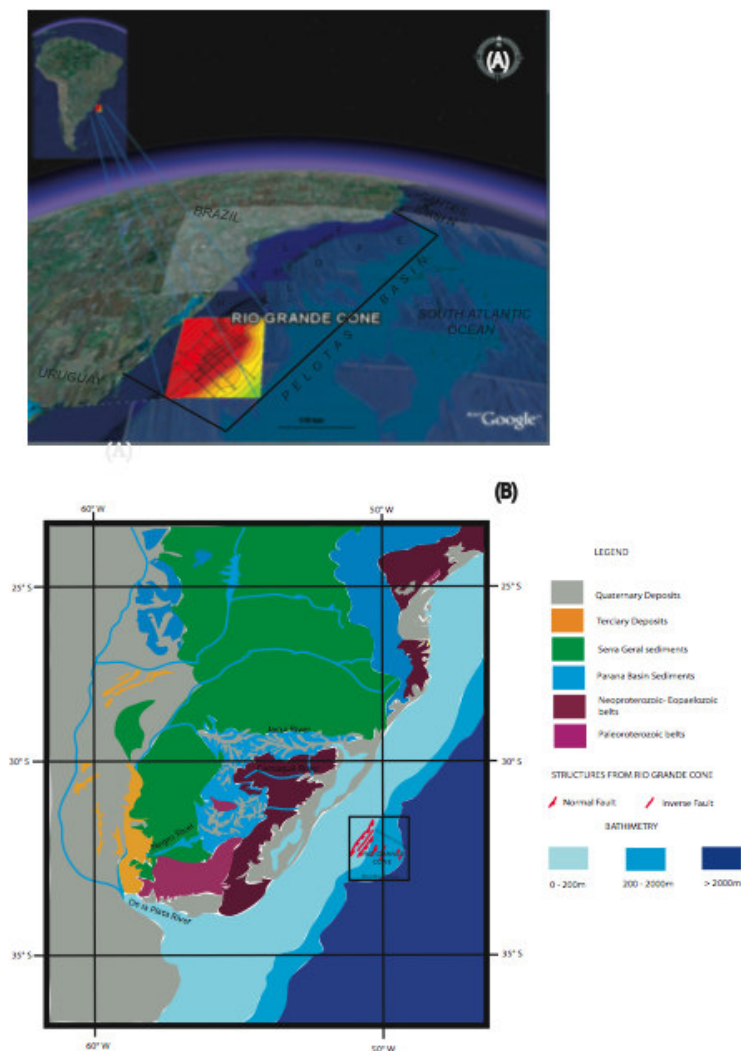


Figura 1. Localização da área de estudo (A) mapa das linhas sísmicas com o posicionamento do Cone de Rio Grande dentro da Bacia, e (B) Geologia geral na margem leste do onshore Brasileiro e estrutural da área do Cone com seu sistema hidrográfico principal (After, AYUP-ZOUAIN, 2003).

1.4 Metodologia

Os estudos relacionados ao Cone de Rio Grande consideram especialmente os depósitos mais recentes, pelo mapeamento de sua forma, continuidade, volume de monotonia de sedimentos, extensão, estruturas, estratigrafia, etc. A integração de estudos anteriores (Figura 2) e a utilização de técnicas de modelagem e visualização, permitem obter uma boa aproximação dos parâmetros geofísicos.

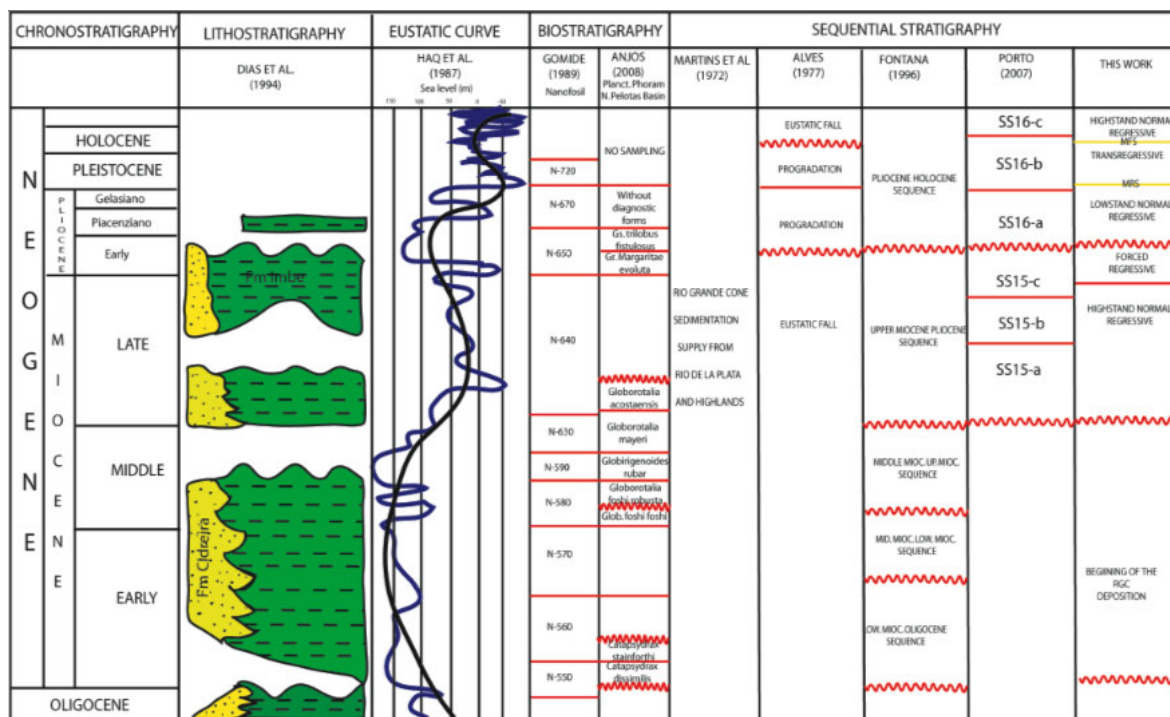


Figura 2. Colunas com a descrição litoestratigráfica, curva eustática, bioestratigrafia, do nível do mar e a evolução dos trabalhos de estratigrafia de seqüências aplicados para o Cone de Rio Grande (Fonte: Autor da tese).

As técnicas para interpretação sísmica podem ser divididas segundo a configuração dos dados, sendo volume ou seção, assim a interpretação pode ser classificada como: clássica (por linha 2D/3D), por volume (opacidade, coerência), *merge* (2D e 3D) ou geomorfológica (quantitativa). Neste estudo os procedimentos para a interpretação sismoestratigráfica a partir de dados sísmicos envolvem quatro estágios principais: (1) análise de seqüência sísmica; (2) análise de fácies sísmica; (3) análise estrutural e (4) análise de variações do nível do mar. A análise de seqüências sísmicas envolve a identificação dos maiores pacotes de

reflexões que podem ser delineados para reconhecer superfícies de descontinuidade. As seqüências (MITCHUM *et al.*, 1977), definem unidades estratigráficas separadas por discordâncias ou suas concordâncias correlativas, cujo mapeamento são chaves para a análise da seqüência sísmica. As discordâncias podem ser reconhecidas pela interpretação sistemática dos padrões de terminação dos refletores ao longo das superfícies de discordância (*onlap*, *downlap*, *toplap* e truncamento). Para a área foram identificados unidades deposicionais ou sistemas deposicionais marinhos regressivo-transgressivos. Essas seqüências fornecem um arcabouço estratigráfico de primeira ordem, dentro do qual podem ser realizados estudos de fácies sísmicos mais detalhados. A análise de seqüência sísmica envolve: (1) marcar as discordâncias pelo reconhecimento das terminações de reflexões ao longo de suas superfícies; (2) estender ou extrapolar esses limites sobre toda a seção, incluindo áreas onde os refletores são concordantes; (3) repetir o processo de delimitação dos limites de seqüência nos registros sísmicos e correlacionar às seqüências por meio da malha sísmica para produzir um arcabouço tridimensional de sucessivas seqüências sísmicas estratificadas, separadas por discordâncias ou concordâncias correlativas; (4) mapear as unidades de seqüência na base da espessura, geometria, orientação ou outras feições para ver como cada seqüência se relaciona com as seqüências adjacentes. O objetivo da análise da fácies sísmica é as interpretações regionais da litológica, o ambiente deposicional e a história geológica ao descrever várias etapas distintas no processo de interpretação (MITCHUM *et al.*, 1977).

Assim, o primeiro passo é reconhecer e delinear as unidades sísmicas dentro de cada seqüência em todas as seções que estão sendo mapeadas. Cada unidade sísmica é distinguida das unidades adjacentes com base na configuração da reflexão, continuidade, relação dos limites, terminações e mudanças laterais, velocidades e geometria das unidades sísmicas.

Todos esses fatores, excetuando a velocidade intervalar e geometria externa, podem ser visualmente estimados a partir dos perfis sísmicos bidimensionais. A determinação da geometria externa deve ser feita por mapeamento, enquanto a velocidade intervalar requer técnicas de processamento e geofísicas especiais. Após o mapeamento da geometria e da espessura dos pacotes de reflexão, o próximo passo é combinar esses resultados com a velocidade intervalar.

A geração do modelo tridimensional permite entender feições ou estruturas encontradas em profundidade, onde interpretações geológicas incluem a integração de

características derivadas de estratigrafia como também das análises geomorfológicas. Há dois modos de se chegar à geomorfologia sísmica (POSAMENTIER, 2004):

- a) Olhar para a superfície próxima até centenas de metros, onde a resolução sísmica e qualidade de dados são maiores;
- b) Entender como sistemas deposicionais podem ser imageados e que tipo de características estratigráficas pode ser obtido.

A Análise do dado sísmico é uma metodologia subjetiva para exploração e desenvolvimento. Mediante a aplicação das técnicas de geomorfologia sísmica e a integração de técnicas modernas de visualização e interpretação, podem-se detalhar com precisão a localização de geoformas, corpos e preenchimento de seqüências. Com isto as áreas de estudo podem ser demarcadas e quantificadas de forma precisa.

A metodologia para alcançar os objetivos da teses deve ser ajustada segundo requerimentos, limitações e a disponibilidade de recursos técnicos e dos dados. Para desenvolver um modelo sismogeomorfológico do intervalo Terciário ao Recente da geologia do Cone de Rio Grande, primeiro foi definido um arcabouço da Bacia de Pelotas, onde se encontra o Cone. Os dados cronoestratigráficos são baseados em compilações bibliográficas de trabalhos anteriores (MARTINS, *et al.* 1983; FONTANA, 1996; ABREU, 1998; ANJOS-ZERFASS *et al.*, 2008). A informação requererá o estabelecimento um modelo ou função de velocidade conceituada com características particulares baseadas nos dados das caixas de velocidades da sísmica de processamento e dados de poço para a interpretação dos dados. Com as velocidades calculadas, pode ser estabelecida uma função que permite estender os dados para fora do plano e serem interpretados na vizinhança mais próxima, assim os dados podem ser incluídos ou estendidos para uma modelagem quase tridimensional (q3D), considerando um modelo dois e meio dimensional (2.5-D), dando como resultado um modelo de velocidades, indispensável para a configuração, interpretação e visualização geomorfológica (Artigo I).

Com a análise tectono-estratigráfica procurou-se identificar padrões de sedimentação, geomorfologia, estratigrafia e da estrutural, obtendo um modelo para as seqüências superiores (até 1000ms) baseados em interpretações sísmicas. O método se baseia na sismoestratigrafia das seqüências adaptadas para o estudo, onde o modelo permite visualizar os diferentes elementos

estruturais, estratigráficos e geomorfológicos (Artigos II e artigo III). O modelo final está acompanhado de uma série de imagens dinâmicas nas quais foram extraídos vídeos referentes às diferentes características do Cone (Artigo IV e vídeo - Apêndice A).

1.4.1 Geofísica – Sísmica de Reflexão

A informação geofísica para o estudo compreende 3700 km de linhas sísmicas bidimensionais, com um grid de 170x150 km de caráter regional, com offset amplos, longitude de registro até 6 segundos e taxa de amostragem de 4ms. Os CDP's (ponto comum na profundidade) proximais (*near offset*) permitem o cobrimento da plataforma, e já os CDP's distais (*far offset*) o cobrimento respectivo do talude e do sopé. A essas imagens das seções foram aplicados alguns atributos onde é possível revelar os padrões de estratificação dos processos deposicionais e da paleotopografia (erosão) para a interpretação dos dados sísmicos. Alguns parâmetros devem ser considerados para definir a informação geológica. As terminações permitem definir a seqüência sísmica (seqüência deposicional obtida da sísmica, limitada por discordâncias, VAIL *et al.*, 1977). Essas amplitudes são valores reais que representam o tempo de propagação da reflexão da onda. Para a representação ou visualização os dados são imageados tanto em cor como em opacidade. O sinal sísmico pode ser considerado a partir de um modelo convolucional, etapa chave para o processo de dados sísmicos, que permite obter um traço sísmico (1-D), e dados 2-D ou volume 3D. Assim, para visualizar os dados, antes de serem levados à interpretação, estes passam por etapas, onde é necessário aplicar ferramentas como filtros, transformadas, testes, etc., com intuito de conseguir a melhor imagem. A utilização de atributos sísmicos foi considerada, embora seja mais limitada, por que os dados estão restritos a seções verticais. Coerência, RMS, freqüência instantânea e alguns outros são atributos utilizados na análise sismoestratigráfica.

Utilizando a sismoestratigrafia, especialmente as seções de mergulho localizadas nos extremos do Cone podem ser obtidas espessuras de 4000 m (assumindo uma função de velocidade de 2700 m/s). A seqüência estratigráfica empilha ao menos quatro pacotes limitados por superfícies de inundação (Figura 3A), e datadas de informação de poços da Bacia de Pelotas, assim as idades são aproximadas. Estas seções mantêm suas características estratigráficas não

sendo afetadas por eventos estruturais, ao contrário do que acontece com a maior parte das seqüências ao serem analisadas em áreas como os depocentros onde o pacote sedimentar está sendo afetado por forte falhamento, intrusões, dobras, etc.

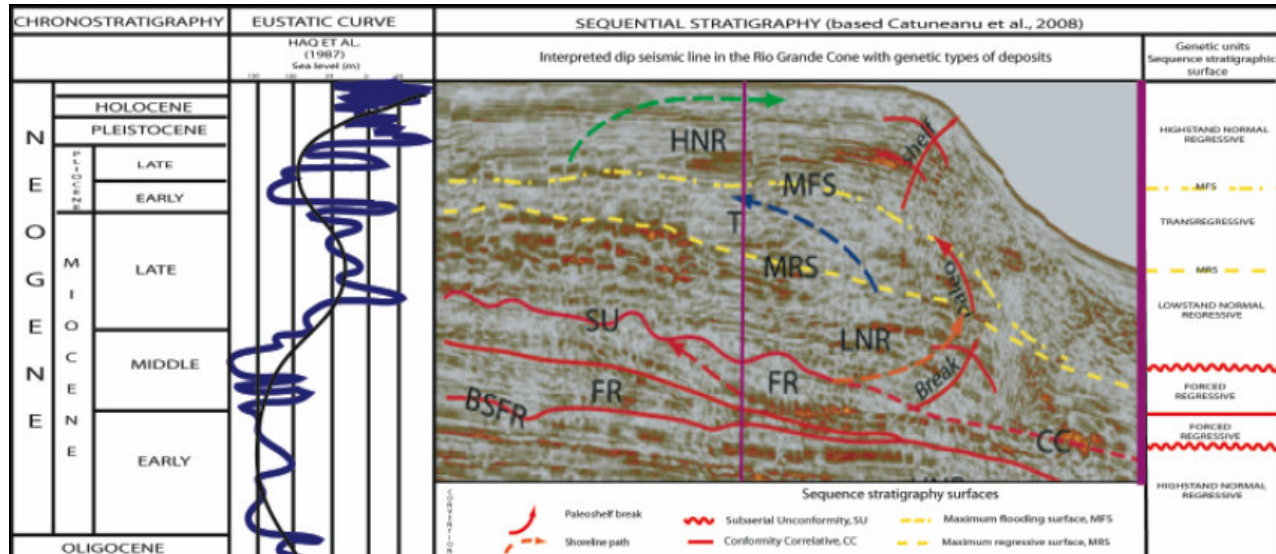


Figura 3. Interpretação sismoestratigráfica das seqüências T-R do Cone de Rio Grande

A partir das análises sismoestratigráfica, o arcabouço sísmico do Cone de Rio Grande é caracterizado pela alternância dos pacotes de clinofomas progradantes com refletores contínuos, estratificados, onde puderam ser identificados sistemas de complexo de canais dispersos ou cortados por feições erosionais nas áreas proximais (Artigo III). As clinofomas ocupam parte da plataforma e se estendem por ela, tendendo a empilhar-se no talude.

Os sistemas deposicionais mais relevantes do estudo, classificados como transgressivo-regressivas (EMBRY, 2002), correspondem aos sistemas: regressivo de nível de mar alto, Transgressivo, regressivo de nível baixo e à possível regressão forçada (CATUNEANU, 2008).

1.4.2 Análise estrutural

No modelamento sísmico é necessário fazer um estudo das estruturas que afetam a área, para poder determinar a relevância da geotectônica com relação à estratigrafia. Esta análise corresponde ao modelo ou mapeamento de estruturas como falhas ou dobras devido à possível

influência tectônica. Existem alguns elementos estruturais que podem ser mapeados a partir das seções ou do volume sísmico, considerados para análise e interpretação (Quadro I). Na área do Cone foram estabelecidos vários domínios estruturais, sendo os mais relevantes o Sistema de Falhas Normais, com o mapeamento da falha principal, e o sistema de falha reverso, com falhamentos de menor porte que afetam zonas mais rasas e distais do Cone de Rio Grande (Figura 4). A tectônica extensional é representada por um sistema de falhas poligonais, restritas ao Cone, com uma falha lítrica mestre, a qual pode ser modelada como um dos elementos tectonoestruturais mais relevantes. Outras feições características compreendem altos estruturais, dobras e o refletor simulador de fundo (Artigo III).

O sistema de falhas e a superfície simuladora do fundo as dobras podem ser visualizadas na animação estrutural (Anexo A) onde aparecem a falha mestre, falhas secundárias normais e falhas direcionais. O caso da superfície simuladora do fundo é incluído dentro dos elementos estruturais por que está associada às falhas e marcam a profundidade máxima da zona de gás hidratado. Este é apresentado como uma anomalia geofísica gerando um branqueamento ou redução da iluminação do traço sísmico, o que reduz o contraste de impedância acústica (CLENELL, 2000).

ELEMENTO ESTRUTURAL REGIME TECTÓNICO	CARACTERÍSTICA DA REFLEXÃO SÍSMICA	OBSERVAÇÕES
Dobras	Reflexões com geometria de anticlinal ou sinclinal	Precisa ser migrada para Presença de <i>Bow tie</i>
Falhas Normal (extensional)	Reflexões sistemáticas Difrações Zonas de sombra (pouca ou nenhuma reflexão) onde existem	Estratigrafia é removida <i>Pull Down</i> de Velocidades
Falha Inversa	Antiformas no <i>hanging wall</i>	Estratigrafia repetida <i>Pull up</i> de velocidades
Falha de Rumbo (transpressão ou transtensão)	Estruturas em flor algumas vezes aparentes Zonas de refletividade incoerentes ao longo de planos de falha subvertical.	
Domos (margem passiva)	Reflexões nulas, delineadas por estratos adjacentes	
Colapso (plataforma)	<i>Drapes</i> de camadas sobrejacentes	
Diápiros de folhelhos		
Estrutura acamadamento inclinado-paralela	Aparentam pacotes acunhados	
Carbonatos	Geram velocidades anômalas com refletores como dobras.	

Quadro 1. Elementos mapeáveis e características estruturais.

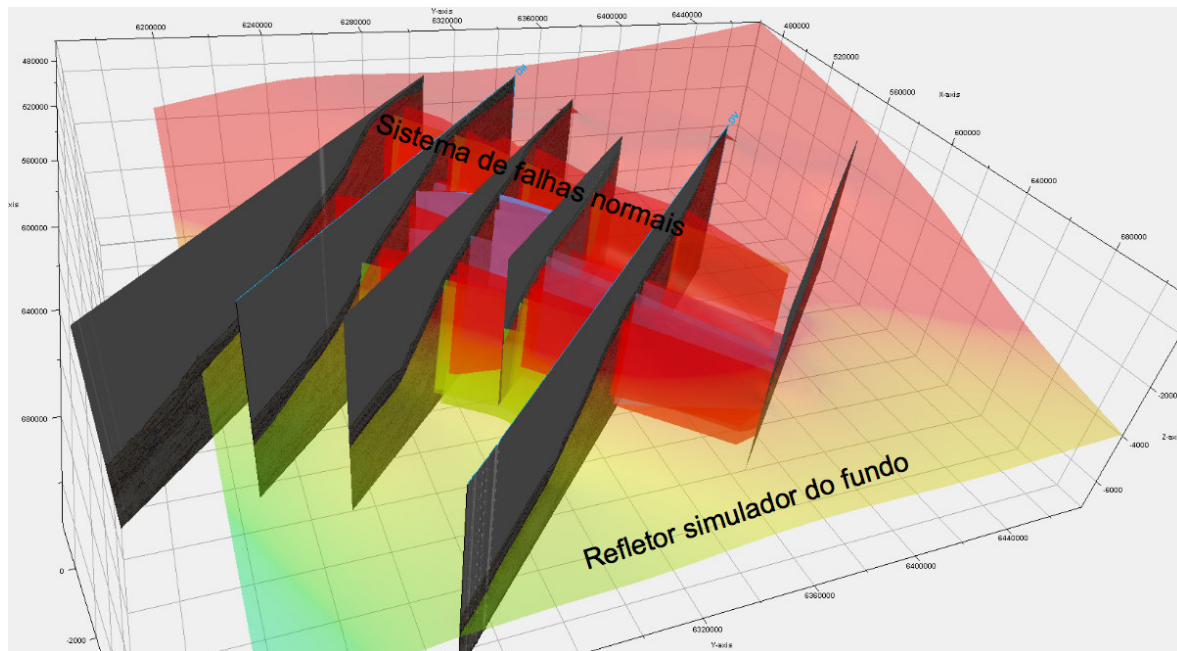


Figura 4. Elementos estruturais relevantes localizados no Cone de Rio Grande. Compreende sistema de falhas normais, superfície simuladora do fundo e altos estruturais (Fonte: Autor).

1.4.3 Estratigrafias de seqüências.

A estratigrafia de seqüências fornece ferramentas para a análise estratigráfica de bacias como a correlação e análise de fácies. O modelo conceitual da estratigrafia de seqüências tem avançado desde a introdução da estratigrafia sísmica (VAN WAGONER *et al.*, 1990; LOUCKS & SARG, 1993; VAN WAGONER *et al.* 1995; BROWN & FISHER, 1997) e na última década os ambientes de águas profundas tem recebido mais atenção (MITCHUM, 1985; WEIMER AND LINK, 1991). Os modelos conceituais da estratigrafia de seqüências fazem com que o intérprete utilize ferramentas de visualização 3D com o apoio de atributos sísmicos (RADOVICH & OLIVEROS, 1998).

Segundo a estratigrafia de seqüências, o limite que separa o sistema de nível de mar alto (HNR) do Transgressivo compreende a superfície de inundação máxima separando um grande pacote prográdacional de outro retrogradacional, com evidências erosivas no limite superior da seqüência. O limite inferior da seqüência está caracterizado pela presença de um horizonte discordante com evidências de zonas de canais erosionais identificados sobre o talude,

e a identificação de clinofórmata prográdacional referente ao sistema de nível de mar baixo (LSN) (POSAMENIER & ALLEN, 1999).

A seção Holoceno ao Recente varia, apresentando-se delgada no setor proximal e mudando para espessuras maiores distalmente, sobrepostas à superfície transgressiva, que tem uma espessura menor e caracterizada pelo padrão retrogradacional.

1.4.4 Geomorfologia Sísmica

A estruturação da geomorfologia iniciou-se pelos trabalhos pioneiros de Hutton (1788). Na geomorfologia a unidade elementar é a geoforma, definida como um corpo tridimensional que tem forma, tamanho, volume e topografia que já foram classificadas e estão sendo utilizadas na geomorfologia sísmica. A geoforma tem uma gênese e dinâmica que explica os materiais que a formaram. Como geoformas, as rochas formam diferentes tipos de depósitos como: deltas, leques, terraços ou planícies. O princípio geomorfológico no estudo de Estratigrafia de Seqüências, de reservatório e de geoformas começou a ser aplicado como ferramenta de reconhecimento e interpretação (CARTER, 2003; POSAMENTIER & KOLLA, 2003). Com isto notou-se que quando a geomorfologia sísmica é integrada com a estratigrafia de seqüências, envolvem diferentes tecnologias de visualização, análises de atributos e imageamento para o entendimento da evolução de uma bacia.

A Geomorfologia Sísmica Quantitativa (QSG) é a extensão da geomorfologia sísmica (Wood, 2003) e tem aplicação no desenvolvimento do planejamento do estudo da engenharia sísmica (*geohazard*), da modelagem, da exploração de reservatórios e de seu volume de rocha (CARTER, 2003; WOOD, 2003) que permite mostrar a relação entre processos massa-transporte e sistemas de canal-*levee* (FACHMI & WOOD, 2003; ZENG *et al.* 2001; WOOD, 2003; MOSCARDELLI & WOOD, 2006). Linhas sísmicas e poços possibilitam examinar ambientes com diferentes sistemas: deltaico, fluvial, marinho-raso, como também a borda de plataforma (MOSCARDELLI *et al.*, 2006; MIZE & WOOD, 2004). A geomorfologia sísmica inclui análises de dados morfométricos (LEOPOLD AND MADDOCK, 1953) e geomorfologia

quantitativa de sistemas antigos a partir de sistemas modernos (DUNCAN, *et al.*, 2000; SANCHEZ & WOOD, 2006).

Estudos de morfologia e mapeamento para águas profundas e cânion começaram a aparecer baseados em técnicas de geomorfologia sísmica e a extração de atributos (RISCH *et al.*, 1996). Na análise de dados para águas profundas em ambientes diferentes, cada elemento deposicional apresenta morfologias e características sísmicas únicas (POSAMENTIER and KOLLA, 2003; AMBROSE *et al.*, 2005; GEE *et al.*, 2006). Aproximações do estudo da geomorfologia sísmica são encontradas em estudos de seqüências sedimentares e fácies, correspondendo às análises de parâmetros sísmicos (BROWN *et al.*, 1977; BERG, 1982). A tecnologia sísmica tridimensional é indispensável para a geociência futura, como ferramenta efetiva, eficiente e precisa da análise dinâmica da superfície (TAKANO, 2005).

Neste estudo, a Exploração Sísmica está direcionada para a integração da estratigrafia de seqüências, e a geomorfologia sísmica de dados bidimensionais incluindo a análise de atributos sísmicos, a visualização e a modelagem. Isto constitui uma aproximação possível quando não é possível contar com dados de volume. A morfologia da quebra de plataforma esta constituída de um sistema de falhamento no setor central do Cone, onde uma grande quantidade de volume parece deslizar-se sobre a falha principal com fluxos de detritos, turbiditos, *slumps*, como resposta a feições de instabilidade, isto devido às características da quebra na plataforma e o momento sin-sedimentar da falha que controla sua geometria.

1.4.5 Modelamento e Visualização q3D

Modelagem e visualização de dados geológicos tem se incrementado na medida que se reduzem os custos nas diferentes etapas da exploração sísmica, e a capacidade computacional se incrementam (maior resolução, penetração, memória e armazenagem).

Ao serem estabelecidas as diferentes seqüências, feições estruturais e geomorfológicas pertencentes ao Cone de Rio Grande poderão ser gerado o volume restrito da área de interesse e mapeadas as propriedades.

1.5 Resultados obtidos

As interpretações geomorfológicas, estratigráfica e tectônica, foram feitas a partir da sísmica bidimensional e recursos não exclusivos da configuração tridimensional e compreendem ferramentas poderosas para o entendimento do subsolo. As análises sísmicas ao serem correlacionadas com atributos sísmicos possibilitam o modelamento e a visualização de corpos em profundidade.

A caracterização dos elementos determinantes da sismoestratigrafia, como sua distribuição temporal e espacial, pode ser obtida mediante a integração e interpretação das seções verticais, a análise de atributos geofísicos, o registro de poço, a função de velocidades e os dados bioestratigráficos.

O Cone de Rio Grande apresenta-se como uma geoforma semi-retangular estendida por 28900 km² e volume de 5.024943x10¹² m³. Contêm seqüências sedimentares alongadas semicirculares afetadas por elementos estruturais que incidem sobre o pacote sedimentar. Um dos principais elementos estruturais mapeados é a falha lítrica mestre que atravessa grande parte da seqüência servindo para a modelagem do arcabouço estrutural e estratigráfico. Além da falha mestre, uma série de sistemas de falhas satélite pode ser mapeada aparecendo como resposta da tectônica distensiva e gerando falhamento normal de pequeno e médio porte.

A definição de anomalias na fácies sísmica permitiu o mapeamento de superfícies como o refletor simulador do fundo marinho (*BSR*) e a identificação de marcas de ondas ou contornos. Os *BSR*'s identificados em seção apresentam geometrias cônicas que descrevem fenômenos adjacentes associados (Artigo IV) a fluxos de escape, inversão de estruturas e intrusões.

Visualizações tridimensionais do volume do Cone de Rio Grande (modelo digitalizado) mediante a interpretação sísmica (feitas anteriormente no papel) constituem em uma ferramenta com a qual foi possível mapear anomalias geofísicas, feições estratigráficas, geomorfológicas e outras feições geológicas ou geofísicas.

A evolução geral do Cone de Rio Grande consiste predominantemente de progradações deposicionais no Terciário, seguido de períodos de extensões com estruturas de tipo normal. Os resultados estruturais, estratigráficos e geomorfológicos podem ser vistos em forma de animações onde visualizamos suas feições em perspectivas diferentes de observação.

Referências

ABREU, V. S. **Geologic Evolution of Conjugate Volcanic Passive Margins: Pelotas Basin (Brazil) and Offshore Namibia (Africa): implications for Global Sea-Level Changes.** 1998. 354p. Doctorate These – Rice University, Houston, Texas, USA, 1998.

ALVES, E. C. **Estrutura rasa do talude e sopé da Margem Continental do Rio Grande do Sul e Uruguai.** 1977. 77 f. Tese (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 1977.

AMBROSE, W. A.; WAWRZYNIEC, T. F.; FOUAD, K.; SAKURAI, S.; JENNETTE, D. C.; L. BROWN, F.; GUEVARA, D. E. H.; DUNLAP, B.; TALUKDAR, S. C.; ARANDA-GARCÍA M.; HERNANDEZ, R. U.; ALVARADO, J. V.; MACIAS, Z, E.; RUIZ, H.; CÁRDENAS, R. HERNÁNDEZ. Neogenetectonic, stratigraphic and play framework of the southern Laguna Madre-Tuxpan continental shelf, Gulf of Mexico: **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 89, no. 6, p. 725–751. 2005.

ANJOS-ZERFASS, G.; SOUZA, P. A.; CHEMALE Jr. F. Biocronoestratigrafia da Bacia de Pelotas: estado atual e aplicação na geologia do petróleo. **Revista Brasileira de Geociências** 38(2), 42 – 62. 2008.

AYUP-ZOUAIN, R. N., FERREIRA, H. L., BARBOSA, E. G.; TOMAZELLI, L. J. Evidência morfológica de um paleocanal holocênico da laguna Mirim nas adjacências do Banhado Taim. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 9, **Anais...**1CD-ROM. 2003.

BALLY, A. W. Atlas of Seismic Stratigraphy. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**. Studies in Geology No. 27, V.1 e 2. 1987.

Barnes, A. Seismic Attributes in your Faces. **CSEG Recorder Article**. Colorado. USA. 2001.

Berg, O. R. Seismic Detection and evaluation of delta and Turbidite Sequences: Their Application to Exploration for the Subtle Trap. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**. V.66, No.9, p. 1271-1288. 1982.

BOOTH, J.R.; DUVERNAY, A. E.; PFEIFFER, D., S.; STYZEN., M.J. Sequences stratigraphy Depositional Model, and Stacking Patterns of Poned and Slope Fan Systems in the Auge Basin: Central Gulf of Mexico Slope. 20th annual bob f. perkins research **conference**. Houston, tx. 2000.

BROWN, A. R. **Interpretation of three-dimensional seismic Data.** Fourth edition. American Association of Petroleum Geologists - American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Memoir 42. 1996.

BROWN, L. F., JR.; FISHER, W. L. Seismic stratigraphic interpretation and petroleum exploration: Geophysical principles and techniques: **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**. Continuing Education Course Notes Ser. 16, p. 56. 1980.

BROWN, L. F. JR.,; FISHER, W. L. Seismic stratigraphic interpretation of depositional systems: examples from Brazilian Rift and pull-apart basins, *in* Seismic Stratigraphy – application to carbon exploration: **American Association of Petroleum Geologists Bulletin Memoir 26**. p. 213-248. 1997.

CARTER, D.C. Channel and sandstone body geometry from 3D seismic and well control in Widuri Field, Offshore SE Sumatra, Indonesia. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Bulletin** v.87, No.6, p. 909-934. 2003.

CATUENANU, O., ABREU, V., BHATTACHARYA, J. P., BLUM, M. D., DALRYMPLE, R. W., ERIKSON, P. G., FIELDING, C. R., FISHER, W. L., GALLOWAY, W. E., GIBLING, M. R., GILES, K. A., HOLBROOK, J. M., JORDAN, R., KENDALL, C. G. ST. C., MACURDA, B., MARTINSEN, O.J., MIALL, A. D., NEAL, J. E., NUMMEDAL D., POMAR L., POSAMENTIER, H. W., PRATT B. R., SARG J. F., SHANLEY, K. W., STEEL R. J., TUCKER M. E., WINKER C., 2008. Towards the standardization of sequence stratigraphy, **earth science Reviews**, doi: http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V62-4TRCYJ9-1&_user=687304&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000037798&_version=1&_urlVersion=0&_userid=687304&md5=3aa6a351da5cabd170fde2dcadbdc3ef. Elsevier's sciences & Technology. British Library.

CHOPRA, S.; MARFUT, K. Seismic attributes – A historical perspective - 75th anniversary. **Geophysics**, v.70, No. 5. 2005. p.3SO – 28 SO.

CLENNELL, M. Hidrato de Gás Submarino: Natureza, Ocorrência e Perspectivas para Exploração na Margem Continental Brasileira. **Brazilian Journal of Geophysics**, Vol. 18(3), 397-410. 2000.

DIAS J. L.; SILVEIRA, D. P.; SAD A. R. E.; LATGÉ M. A. L. Estágio atual do conhecimento geológico. **Boletim de Geociências da Petrobras**, 8(1), p. 235-245. 1994.

DUNCAN, C.S., GOFF, J.A., AUSTIN, J.A.; FULTHORPE, C.S. Tracking the last sea level cycle: seafloor morphology and shallow stratigraphy of the last Quaternary New Jersey middle continental shelf. **Marine Geology**, 170, 395-421. 2000.

EMBRY, A. Transgressive-Regressive Sequence Stratigraphy (T-R), 22nd Annual Gulf Coast Section SEPM Foundation Bob F. Perkins Research **Conference**. 22p. 2002.

FACHMI, M.; WOOD, L. Quantitative Seismic Geomorphology of Belanak and Gabus Fields, West Natuna Basin, Indonesia: American Association of Petroleum Geologists, **Proceedings Abstracts**, Salt Lake City, Utah. 2003.

FONTANA, L., R. **Geotectônica e sismoestratigrafia da bacia de Pelotas e Plataforma de Florianópolis**. 1996. Vol. 1 234 f, Vol. 2 145 f. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Curso de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 1996.

GEE, M.J.R; GAWTHORPE, R.L.; FRIEDMANN. Triggering and evolution of a giant submarine landslide, offshore Angola, revealed by 3d seismic stratigraphy and geomorphology. **Journal of sedimentary research**. SEPM. v.76, 9-19. 2006.

GOMIDE, J. Bacia de Pelotas – Bioestratigrafia baseada em nanofóseis calcáreos. In: SBP, Congresso Brasileiro de Paleontologia, **Anais** 11, 338-351. 1989.

HAQ, B. U.; HARDENBOL, J.; VAIL, P. R. Chronology of Fluctuations Sea Levels since the Triassic (250 years ago to Present): **Science**, V. 235, p.1156-1167. 1987.

HESTHAMMER, J. Improving seismic data for detailed. Structural interpretation, **The Leading Edge**, 18, 226-246. 1999.

HUTTON, J. **Theory of the Earth**: An investigation of the laws observable in the composition, Dissolution and restoration of land upon the Globe. Edinburg, Scotland, 1788.

JOHANNESSEN, E.; STEEL, R. Shelf-margin clinoforms and prediction of deepwater sands. **EAGE**, V.17., No.4. Dec. 2005.

LAWRENCE, P. Seismic attributes in the characterization of small-scale reservoir faults in Abqaiia Field. **The leading edge**, 17, p. 521-525, 1988.

LEU, L. K.; MCPHERSON, J. G.; KAN, Y. Integration of 3-D seismic attributes with core and wireline log for detailed modeling of Cretaceous fluvial reservoirs. (**Report**). Consultant. 1999.

LEOPOLD, L.B.; MADDOCK, T. The hydraulic geometry of stream channel and physiographic implications. **USGS Professional Paper**. v. 252. p. 56. 1953.

LOUCKS, R. G.; SARG, J. F. Carbonate sequence stratigraphy; recent advances and applications: **American Association of Petroleum Geologists**, Memoir 57, 545 p. 1993.

MCCLENNEN, C. E. **Nature and origin of New Jersey continental shelf ridges and depressions**. 1973. 94 pp. Ph.D. Thesis (Doutorate), University of Rhode Island, Providence. Rhode Island, 1973.

MARTINS, I. L. **Modelo Sedimentar do Cone de Rio Grande**. 1983. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Curso de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 205p, 1983.

MARTINS, L. R., URIEN, C. M., BUTTLER, L. W. Províncias fisiográficas e sedimentos modernos da margem continental atlântica. Congresso Brasileiro de Geologia, 26o, Belém-Pará. **Anais... Sociedade Brasileira de Geologia**, p.105-114. 1972.

MITCHUM, R. M. Jr. Seismic Stratigraphic expression of submarine fans, in O.R. Berg and D.G. Woolverton, eds., Seismic Stratigraphic II, **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Memoir 39, p.117-136. 1985.

MITCHUM, R. M. JR, VAIL, P. R.; THOMPSON, S. Seismic Stratigraphy and Global Change of Sea Level, Part 2: The Depositional Sequence as a Basic Unit for Stratigraphic Analysis, American Association of Petroleum Geologists - **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Memoir 26, 1977.

MITCHUM, R. M. JR., VAIL, P. R.; SANGREE, J. B. S. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 6: Stratigraphic Interpretation of Seismic Reflection Patterns in Depositional Sequences. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Memoir 26. 1977.

MIZE, K.; WOOD, L. Controls on the Morphology and Development of Deep-Marine Channels, Eastern Offshore Trinidad and Venezuela: 2004. American Association of Petroleum Geologists, **Proceedings**. Dallas, Texas. 2004.

MOSCARDELLI, L.; WOOD. L. Seismic Geomorphology of Mass Transport Deposits and Controls on Formation and Character, Eastern Offshore Trinidad and Venezuela. The University of Texas at Austin, TX. Abstracts. American Association of Petroleum Geologists. **Annual Convention**, p76. 2006.

MOSCARDELLI, L, WOOD, D.; WOOD. L. Quantitative Seismic Geomorphology studies in Fluvial System a New Approach. The University of Texas. Abstracts VOLUME. AAPG, Austin, TX. **Annual Convention**, 76p. 2006.

OJEDA, H. A. O. Structural Framework, Stratigraphy and Evolution of Brazilian Marginal Basins, **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v.66, No.6, p.732-749, 1982.

OJEDA, H. A. O. **Curso de Sismoestratigrafia**, Texto preliminar, Petrobrás/SEDES/CEN-SUD, Rio de Janeiro. 1991.

PENDLETON, V. M.; HARDAGE, B. A. 3-D seismic imaging of a thin vertically isolated fluvial depositional system reservoir in Seeligson Field. **The leading Edge**, 18, pp. 646-477. 1999.

PEYTON, L., BOTTJER, R., PARTYKA, G. 1989. Interpretation of incised valleys using new 3D seismic techniques: A case history using spectral decomposition and coherency. **The leading Edge**, 17(9).

PORTO, R. A. **Interpretação Sismoestratigrafica da Porção da Bacia de Pelotas que engloba o Cone de Rio Grande e a Avaliação do seu Potencial Petrolífero**. 2007. 264 f. Tese de Doutorado, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Macaé/RJ-Brasil. 2007.

POSAMENTIER, H. Future trends in 3D Seismic Analysis: The integration of seismic Stratigraphy and Seismic Geomorphology. Search and Discovery Article. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**. 4 p. 2004.

POSAMENTIER, H. W., ALLEN, G. P. **Siliciclastic sequence stratigraphy – concepts and applications**. Society for sedimentary geology, Concepts in Sedimentology and Paleontology, 7, 210. 1999.

POSAMENTIER, H. W.; KOLLA, V. Seismic Geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings, **Journal of Sedimentary Research**, 73, p.367-388. 2003.

RISCH, D. L.; DONALDSON, B. E.; TAYLOR, C. K. Deep-water facies analyses using 3-D seismic sequence stratigraphy and workstation techniques: an exemple from Plio-Pleistocene strata, Northern Gulf of Mexico. in: Applications of 3-D Seismic Data to Exploration and Production. P. Weimer and T. L. Davis, eds., **American Association of Petroleum Geologists Bulletin** Studies in Geology No. 42 and society of exploration Geophysicists Geophysical Developments Series No. 5, AAPG/SEG, Tulsa, p.45-56. 1996.

RADOVICH, B.J.; R.BURNET, O. 3-D sequence interpretation of seismic instantaneous attributes from the Gorgon Field. Integration Geophysics corporation. **Footnotes on interpretation**. 1998.

RAMOS, A. N. Estratigrafia Sísmica - Conceitos Básicos (**apostila**). UFRJ, Rio de Janeiro. 1982.

RISCH, D. L.; DONALDSON, B. E.; TAYLOR. C. K. Deep-water facies analysis using 3-D seismic sequence. **Geology**, v. 83, p. 145–176. 1996.

RIVERA, R. D. E.; LOZADA, ZUMAETA, M.; JARAMILLO R; CAMPOS E. Multiresolution Analysis applied to interpretation of seismic Reflection data. **Geofísica International**. Vol. 44(4) pp. 355-368. 2005.

SANCHEZ, C., M.; WOOD, L. Quantitative Seismic Geomorphology of Pliocene and Miocene Age Fluvio-Deltaic Reservoir in the Northern Gulf of Mexico Shelf Province. The University of Texas at Austin, TX. **Annual Convention**. Abstracts Volume. AAPG. 2006.

SKIRIUS, C., NISSEN, S., HASKELL, N., MARFURT, K., HADLEY, S., TERNES, D., MICHEL, K., REGLAR, I., D'AMICO, D., DELIENCOURT, F., ROMERO, T., D'ANGELO, R.; BROWN, B. **3-D seismic attributes applied to carbonates**. The Leading Edge, v.18 (3); p.384-393, 1999.

TAKANO, O. Desenvolvimento de 3D Tecnologia Sísmica - Osamu Takano, JAPEX. 2005. (Center Research, Japan Petroleum Exploration Company, Japan). 2005.

TEIXEIRA, N. A. S.; OLIVEIRA, J. O. Preenchimento do rift-valley na Bacia do Recôncavo. **Revista Brasileira de Geociências**, v.15, nº 2, p.97-102. 1985.

TORRES-VERDÍN, C., VICTORIA, M., MERLETTI, G.; PENDREL, J. Trace-based a geostatistical inversion of 3-D seismic data for thin-sand delineation: An application in San Jorge Basin, Argentina. **The Leading edge**, V. 18 (9), p. 1070-1077. 1999.

VAIL, P. R.; MITCHUM, R. M.; THOMPSON, S. Seismic Stratigraphy and Global Change of Sea Level, Part 3: Relative changes of sea level from coastal onlap” In: Payton, C.E. (Ed) Tulsa. **Seismic stratigraphy – Application to hydrocarbon exploration**. Memoir 26. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, Part. 3. 1977.p.63-81. 1977.

VAN WAGONER, N.A., LEYBOURNE, M. I., PEARCE, T. H.; TIMM, C. E. Comparison of petrogenetic processes between the West Valley Segment of the Juan de Fuca Ridge and adjacent Heck Seamount Chain: Detailed electron microprobe and Nomarski interference imaging of plagioclase: **Canadian Mineralogist**, v. 33, p. 569-583. 1995.

VAN WAGONER, N. A., HEIN, J. F.; MUDIE, P. J. Sedimentary facies and processes of deposition: Ice Island cores, Axel Heiberg shelf, Canadian Polar Continental Margin: **Marine Geology**, v. 93, p. 243-265. 1990.

WEIMER, P.; LINK, M. H. **Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems**: Springer-Verlag, New York, 447p. 1991.

WILGUS, C. R.; HASTINGS, B. S.; KENDALL, C. G.; POSAMENTIER, H. W.; ROSS, C. A.; VAN WAGONER, J. C. Sea-Level Changes - An Integrated Approach, **SEPM** Special Publication No.42. 1988.

WOOD, L. Quantitative Seismic Geomorphology and Reservoir Architecture of Clastic Depositional Systems: The Future of Uncertainty Analyses in Exploration and Production. American Association of Petroleum Geologists, **Proceedings Abstracts**, Salt Lake City, Utah. 2003.

WOOD, J. L. Seismic Geomorphology: The Future of Uncertainty Analysis and Geobody Modeling Parameters for Hydro- and Hydrocarbon Exploration. **Bureau of Economic Geology**, Jackson School of Geosciences. University of Texas Austin. 2003.

YILMAZ, O. **Seismic Data Processing**. Society of Exploration Geophysicists. Tulsa, Oklahoma. 1987. 526 p. 1987.

ZEENG G, H.; WOOD, L.J.; HENTZ, T. H. Stratal slicing of Miocene-Pliocene sediments in Vermilion Block 50-Tiger Shoal Area, offshore Louisiana: **the leading edge**. V. 20(4), p. 408-418, 2001.

2 CORPO PRINCIPAL - ARTIGOS SUBMETIDOS A REVISTAS CIENTIFICAS

**2.1 ARTIGO I. INTEGRACIÓN DE REFLECTORES SISMOESTRATIGRAFICOS Y
ESTRATIGRAFIA DE SECUENCIAS PARA MODELOS DOS Y MEDIO
DIMENSIONALES 2.5-D.**

**INTEGRACIÓN DE REFLECTORES SISMOESTRATIGRAFICOS Y
ESTRATIGRAFIA DE SECUENCIAS PARA MODELOS DOS Y MEDIO
DIMENSIONALES 2.5-D.**

**INTEGRATION OF SISMOSTRATIGRAPHY AND SEQUENCE
STRATIGRAPHY REFLECTORS FOR TWO AND HALF DIMENSIONAL
(2.5-D) MODEL.**

Luis Antonio Castillo Lopez¹³

Thais de Souza Kazmierczak²

Farid Chemale Jr.³

¹ Curso de Geofísica, Departamento de Geociencias – Universidad Nacional de Colombia. Ciudad Universitaria, Carrera 30 No. 45 – 03, edificio 224. Bogotá. Email: lacastillo@unal.edu.co, tel. (51) (71)84057873.

² Schlumberger Servicios de Petróleo Ltda., Pituba Parque Center, av. Carlos Magalhães, 1034/436-A, Pituba – Salvador, Bahia – Brasil. Zip: 41850.000. Telf. (5571)3452-0085 Fax: (5571)3452-2911 email: tkazmierczak@slb.com

³ Instituto de Geociências, Universidade Federal de Rio Grande do Sul Federal, Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43129. Cx.P. 15001. CEP 91501-970. Telf: (5551)3308.7140, Fax: (5551) 3308.7302. Porto Alegre – Brasil. Telf. farid.chemale@ufrgs.br

NOTAS SOBRE LOS AUTORES

Luis Antonio Castillo López

Se graduó como geólogo de la Universidad Nacional de Colombia (1994), con Maestría en Geofísica de la Universidade Federal do Pará (2000), actualmente cursa el Doctorado en Geociencias en la Universidade Federal de Rio Grande do Sul, se desenvuelve como investigador e intérprete en el área de sismoestratigrafía, de la cual ha pasado por las etapas de adquisición, procesamiento e interpretación, esta última el área en la cual se desempeña, aplicando conceptos de estratigrafía secuencial y desarrollo de modelos sedimentológicos. Desarrolla trabajos de investigación y como profesor en los curso de Geofísica y Geología de Universidad Nacional de Colombia y como consultor en el área de métodos sísmicos.

Farid Chemale Jr.

Posee título de Geólogo, por la Universidade do Vale dos Sinos (1978), maestría en Geociencias por la Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1982), doctorado en Naturwissenschaften – Technische Universität Clausthal, Alemania (1987) y pos-doctorado en geocronología por la Universidad de Kansas - USA (1996). Actualmente es investigador 1B del consejo Nacional de desarrollo científico y Tecnológico, profesor titular y coordinador del laboratorio isotópico de la Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Se encuentra desarrollando investigaciones en el área de geotectónica, origen y evolución de cuencas sedimentarias y geología del petróleo, especialmente en Cuencas Brasileñas, Argentinas y África.

Thais de S. Kazmierczak.

Geóloga de la Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1999), con Maestría en estratigrafía de secuencias de la misma universidad (2006). Se desempeñó como profesora de la Universidade Federal do Rio Grande do Sul, en cursos de Geología. Actualmente pertenece a la nómina de Schlumberger, trabajando junto al personal de Petrobras exploración y reservorio en el moldeamiento estático de reservorio de petróleo. Desarrolla trabajos de investigación aplicados al manejo de herramientas y módulos de interpretación sísmica y registro de pozo.

INTEGRACIÓN DE REFLECTORES SISMOESTRATIGRAFICOS Y ESTRATIGRAFIA DE SECUENCIAS PARA MODELOS DOS Y MEDIO DIMENSIONALES 2.5-D.

INTEGRATION OF SISMOSTRATIGRAPHY AND SEQUENCE STRATIGRAPHY REFLECTORS FOR TWO AND HALF DIMENSIONAL (2.5-D) MODEL.

ABSTRACT

Seismic acquisition, processing and computational development had permitted obtain information, increasing support, load, visualization and interpretation with more resolution, fold and offset. Early papers that describe sequence stratigraphy they refer passive margin areas with reflection methods. Those techniques have been changed for integrated studies with well techniques, core, photo-interpretation or surface mapping. For this work had been implemented a 2.5 Dimensional seismostratigraphic model (2.5 dimensional models: 2D lines extended to two and half dimensional where is considered another dimension- in this case lateral extension with punctual source). This kind of model could be considered when is necessary a good approximation to 3D configuration, it justify the conversion from 2D to quasi-3D model. The final model is the representation of a feature located in the southern Brazilian offshore.

Keywords: Geophysics, seismic interpretation, sequence stratigraphy, modeling and visualization.

RESUMEN

El desarrollo de sistemas computacionales, la adquisición, el procesamiento y la interpretación, sísmica han permitido obtener datos sísmicos de mejor calidad, incrementando el soporte, carga, visualización y la interpretación con informaciones de mayor resolución, cubrimiento y offset. Los primeros trabajos que hacen referencia a estudios de estratigrafía de secuencias habían sido efectuados en márgenes de tipo pasivo, y exclusivamente con métodos de reflexión sísmica, lo que ha ido cambiando para estudios integrados con técnicas de pozo (*log*), núcleos de perforación, hasta datos de foto interpretación (fotografías aéreas e imágenes de satélite) o levantamientos de campo (afloramientos). En este trabajo es realizado un modelamiento sismoestratigráfico 2.5-D, considerando líneas 2D, extendidas para una interpretación 2,5 dimensional. Debido a la influencia del parámetro adicional, en este caso la extensión lateral no considerada en 2D, suponiendo una fuente puntual, como es el caso de un modelo sintético; en tanto para modelos analíticos puede considerarse una dirección adicional, por ejemplo, una paleo corriente, dirección de flujo o sentido de transporte. El modelo 2.5 dimensional es considerado cuando no se cuenta con datos 3D, lo cual se justifica para extender la interpretación de 2D para un casi 3-D (q3D), y con esto hacer posible el modelamiento. Los datos para el modelo implementado corresponden a un rasgo geomorfológico localizado mar adentro del sureste Brasileiro.

Palabras claves: Geofísica, Interpretación sísmica, Estratigrafía de secuencias, Modelamiento y visualización.

INTRODUCCIÓN

Los datos geológicos pueden ser obtenidos a través de información sísmica, mediante técnicas de reflexión. Así el método de reflexión sísmica se constituye en una herramienta confiable y poderosa para el estudio y modelamiento del subsuelo, que no puede ser mapeado con otras técnicas debido a su poca capacidad de penetración y de muestreo. La interpretación sismoestratigráfica puede ser clasificada, según la configuración espacial utilizada, así:

- Secciones 2D interpretadas a partir de secciones *inline* o *xline*, obteniendo horizontes estratigráficos e facies. En el caso de ser soportados con datos de afloramiento o núcleos, por ejemplo, Sedimentología sísmica.
- Extensión lateral de las secciones interpretadas (exclusivamente para datos 2D), dando como resultado un modelo dos y medio dimensional (2,5-D).
- Interpretación de datos vistos en planta (geomorfología sísmica). En este caso además de contar con secciones, se tienen secciones en planta y análisis de atributos, para obtener modelos tridimensionales. Por ejemplo, interpretación sísmica tridimensional (3D).
- Interpretaciones Cuatro dimensiones (4D), constituyen el estudio de modelos tridimensionales en el tiempo, para evaluación de fluidos, flujos, etc.

El estudio sismoestratigráfico para el modelamiento puede constituir una metodología que permite construir el carácter geométrico, dinámico para la interpretación de facies estratigráfica y la reconstrucción de la historia geológica de una cuenca.

INTERFACES Y MODELO DE VELOCIDADES

Datos geológicos analizados a partir de parámetros sísmicos son direccionados para parámetros como los coeficientes de reflexión, análisis de amplitudes y velocidades. Los factores que generan las reflexiones sísmicas son importantes para la estratigrafía. Se constituyen en el evento sísmico que tiene por características:

- Respuesta a cambios significativos relacionados con velocidad- densidad a través de superficies de estratificación ou discordancias.
- Las reflexiones son generadas en las discordancias porque estas separan rocas con propiedades físicas diferentes.
- El efecto de meteorización puede acentuar la impedancia (contraste velocidad-densidad) a lo largo de las discordancias.
- Reflexiones son generadas en las superficies de estratificación donde existen diferencias litológicas o texturales que reflejan el contraste de velocidad-densidad.
- El evento de reflexión identificado en el registro sísmico puede ser causado por reflexiones de varias superficies de estratificación, caso de capas delgadas o eventos de otro plano (dos y medio Dimensiones, 2.5-D).
- Los registros sísmicos tienen características (o una firma) que pueden ser relacionadas a litología, espesura, espaciamiento o continuidad.

La relación velocidad y densidad está contenida en las reflexiones, que permiten establecer una relación entre amplitudes y las ondas (Fig. 1).

[FIGURA 1]

Las amplitudes son función de la Energía E de la onda sísmica, el espacio entre superficies reflectoras (contraste de velocidades y densidad, ρv) y la porosidad (presencia de fluido o gas) en la roca Φ_r , puede ser expresa como:

$$A(E, \rho v, \Phi_r), \quad (1)$$

donde, la amplitud es controlada por la energía de la onda o el contraste de velocidades y el espacio entre las superficies reflectoras, aumentando las amplitudes cuando las ondas se encuentran en fase o reflejando energía. Además, la roca presenta poros, que pueden ser ocupados de fluido o gas, aumentando la amplitud.

Las velocidades sísmicas se constituyen así en un parámetro físico relevante, debido a su variación en los diferentes tipos de roca (Fig. 2). Esas velocidades en diferentes litología puede verse sobrepuesta, debido a variaciones de porosidad, de modo que la velocidad por si sola no es suficiente para distinguir tipos de roca, por ejemplo la velocidad de ondas sísmicas en areniscas de baja porosidad puede ser la misma para una roca calcárea con alta porosidad. La velocidad puede ser clasificada según los parámetros utilizados, por ejemplo, velocidad media, intervalar, de apilado, raíz cuadrática media (*RMS*), etc.

[FIGURA 2]

La velocidad asociada a la litología es la velocidad intervalar y se refiere a la velocidad media de las ondas sísmicas entre reflectores. Los perfiles de registro sísmicos fornecen información para determinarlas en unidades con predominio de lutitas, areniscas o calcáreos que pueden ser utilizadas para conversiones de tiempo a profundidad por medio de la velocidad en un modelo acústico o de velocidades. Los datos medios de la velocidad intervalar pueden variar en lutitas de 200 a 4600 m/s, en areniscas de 2800 a 5800 m/s y calcáreos entre 3800 a 6000 m/s. En cuanto a la velocidad RMS puede considerarse el equivalente a la velocidad de apilado

(velocidad de procesamiento), en el caso de un reflector plano con offset pequeño, no siendo medible físicamente.

Durante las etapas de procesamiento del dato sísmico son producidas secciones que constituyen una aproximación de la geología del subsuelo y no exactamente una imagen fiel del subsuelo. Para el caso de modelos estratificados plano paralelos, el modelo puede ser bastante próximo, mas en áreas donde la estratificación se ve afectada por la tectónica o eventos de deformación, cambios en litología o velocidades, superficies irregulares, condiciones de frontera, capas meteorizadas, pueden incidir en la imagen final y por lo tanto en la interpretación (Fig. 2).

MODELO SISMICO 2,5D

Datos geofísicos y especialmente la información sísmica se constituye en información restringida, debido a los altos costos de sus diferentes etapas: adquisición, procesamiento, interpretación y modelamiento. El dato sísmico comprende trazos, secciones o volúmenes, obtenidos a partir de arreglos matriciales que pueden ser ordenados por muestras o por canales. Estos según el arreglo pueden ser visualizados como trazos sísmicos o según el número de muestras (Fig. 3).

[FIGURA 3]

Además estudios estratigráficos y específicamente de geomorfología sísmica, son limitados y requieren de volumen de datos, siendo interpretados a partir de la combinación de secciones y de vistas en planta (3-D). Estas interpretaciones emplean métodos donde son consideradas modelos homogéneos y regulares. Mediante el presente estudio se pretende establecer una aproximación al modelo tridimensional contando con una malla de líneas 2D y la

información de pozo, obteniendo un modelo final con velocidades a partir del dato sísmico y de Log de velocidades. Así la evaluación e interpretación en un medio 2.5-D, el cual emplea datos bidimensionales (2-D), incluyendo eventos fuera del plano, considera una fuente de tipo puntual (o volumétrica). Esta consideración establece un modelamiento geofísico, donde la velocidad de la onda varía a lo largo de dos coordenadas, permaneciendo constante en una tercera coordenada. Esta situación, conocida como modelo dos y medio dimensional (2,5-D), posee características típicas de muchas situaciones de interés en la exploración, por ejemplo, adquisición de datos sísmicos 2-D con receptores a lo largo de una línea sísmica con una fuente 3-D (Castillo *et al.*, 2002), o en caso de estudio para amenazas y microzonificación sísmológica (Slob *et al.*, 2002) o en la industria minera (Malehmir *et al.*, 2009).

El concepto de 2,5D puede ser extendido desde la adquisición de tipo sintético, para la interpretación y modelamiento geofísico o geológico. Esta situación es justificada debido a la limitante de los datos cuando no se cuenta con secciones en planta, por ejemplo el caso de configuraciones 1D o 2D. Para ello se hace necesario establecer un parámetro para extender la información fuera del plano. La geología no se limita a un solo plano, esta presenta variaciones laterales, que deben ser considerados con el conocimiento de las características y parámetros geofísicos en la interpretación estratigráfica. Otra consideración puede ser hecha al utilizar un modelo transversalmente isotrópico (isotrópico en la dirección vertical e anisotrópico verticalmente), así podemos tener un modelo 2,5D donde las secciones sísmicas consideradas (buzante y de rumbo) permiten interpretar estructuras y superficies estratigráficas con variaciones laterales. Esta consideración es hecha ya que los datos sísmicos migrados en 2D, especialmente secciones de buzamiento no presentan una buena aproximación al ser amarradas con las secciones de rumbo, por lo tanto las consideraciones hechas con parámetros geofísicos (velocidad, fuente) permiten una mejor aproximación para el modelo en profundidad.

Los datos recogidos a partir de una malla 2.5-D pueden ser calibrados regularmente con datos de pozo o de núcleos, constituyéndose en los de mayor confiabilidad, aunque muchas veces no se cuenta con dicha información. Para suplir la deficiencia de este parámetro, está siendo considerado un modelo de velocidades, que se constituye en el mejor parámetro geofísico para el modelamiento y conversión en profundidad.

INFORMACIÓN GEOFÍSICA

Los datos recopilados corresponden a secciones sísmicas de costa afuera, interpretadas, usando criterios de estratigrafía de secuencias, a partir de trabajos previos del área. Las interfaces consideradas en el modelo fueron interpretadas de eventos laterales vecinos, donde se asume la misma velocidad lateral, y por condiciones de frontera y del principio de uniformidad esta se mantienen constante. Las interfaces correspondientes a los diferentes reflectores en el modelo están representados por el fondo del mar – FM (figs. 4 y 5), caracterizado por una velocidad constante en ambas capas y densidad constante en el modelo.

[FIGURA 4]

Los datos sísmicos fueron generados a a partir de una configuración simétrica con una fuente puntual de fase zero tipo Ricker de 50 Hz, Intervalo de Grupo = 25m, Intervalo de Disparo = 25m, con amplitudes variables.

[FIGURA 5]

Estudios de modelamiento de cuencas y conversión a profundidad presentan evidencias de la existencia de función de velocidades normal para shale, por ejemplo, describen la relación lineal del incremento de la velocidad con la profundidad (Japsen (2006), Storvoll *et al.*, (2006)). La función de velocidades que describe el modelo cuya velocidad (V_p) varia linealmente con la profundidad (P) puede ser expresa como:

$$V_p = V_o + K * P. \quad (1)$$

Donde se considera una velocidad inicial del fondo de mar $V_o = 1500\text{m/s}$, y una constante K que muestra una relación para una velocidad variable con la profundidad de 0.57, (Fig. 6).

La serie de sedimentos predominantemente de shale en el área del Cono de Rio grande, se caracteriza por una variación lineal con la profundidad, exceptuando los intervalos a 1250 a 1400 metros y a 1500-1550, 2000-2100, donde pueden ser observados inversiones de velocidades, que pueden ser asociadas a la presencia de material compactado, carga litostática y la porosidad. La compactación de sedimentos es controlada por su composición y los cambios mecánicos y químicos durante el enterramiento, para el área de estudio, caracterizado por las facies de shale y lutitos, presentan una compresibilidad que varia por la presencia de diferentes minerales constituyentes. Estos parámetros para shales varían de forma que las respuestas en los registros sísmico y la sísmica varían (Storvoll *et al.*, 2006).

[FIGURA 6]

Las velocidades se presentan con valores que varían desde 1500m/s para la parte más superficial, variando para 1800m/s, llegando hasta 3200m/s a profundidades de 3000m. La

presencia de inversiones de velocidades son debidos al material arcilloso que varía composicionalmente, lo que da resultado elementos más compactos que influyen la velocidad (Fig. 6). Para las velocidades de las líneas sísmicas fueron utilizadas cajas de velocidades del procesamiento (Velocidades de apilado), que aunque no son consideradas de lo mejor para un proceso de conversión o de modelamiento, es la única información disponible que se cuenta para el análisis e interpretación.

ESTADO DE ARTE.

El interés por un modelo 2,5-D surge con la necesidad de expandir el uso regular de datos 2D, para un estudio llevado en lo posible para 3D, lo cual sería más aproximado para un modelo final. Estudios de sismoestratigrafía, muestran la relevancia en los avances de los métodos sísmicos, con análisis que permiten evidenciar la presencia de superficies de discontinuidades isócronas y superficies correlatas de continuidad, hacia cuenca adentro, con esto son reconocidas unidades deposicionales en cuencas sedimentarias y definida la cronoestratigrafía, basada en el posicionamiento temporal de las discontinuidades que limitan las unidades genéticas del depósito.

La mayor difusión de los conceptos estratigráficos aparecen con la integración del método sísmico y la correlación con la curva de variación eustática (Vail *et al.*, 1977; Haq *et al.*, 1987; Van Wagoner *et al.*, 1988; Posamentier *et al.*, 1992; Posamentier & Allen, 1999). Después, sobresale la revisión en la publicación especial 42 de la SEPM en 1988 y en trabajos más recientes de Catuneanu (2006), a través de la interpretación sísmica y registros de pozo. En estas

dos publicaciones son incluidos conceptos como secuencia deposicional y una metodología utilizando las terminaciones de los estratos e incluyen estudios de afloramiento.

A partir de la sismoestratigrafía, y dentro de su resolución, los reflectores sísmicos siguen la estratificación que son bastante próximas a las líneas de tiempo, donde pueden ser observadas las relaciones geométricas de los diferentes paquetes sedimentares estableciendo unidades genéticamente relacionadas y cronoestratigráficas, estableciendo ciclos eustáticos detallados. En este punto la estratigrafía de secuencias puede ser entendida como la expresión en el registro estratigráfico de la historia de las variaciones del nivel del mar, debido principalmente a las variaciones eustáticas que permitan una correlación a escala global, punto bastante cuestionado (Miall, 1997).

La estratigrafía de secuencias ha sido ampliamente aplicada con diferente precisión e rigurosidad, por lo que es importante recalcar que debe ser considerado como una herramienta y no como un molde rígido. Debido a la aparición de una serie de modelos, términos, etc., que han hecho que la estratigrafía de secuencias se torne más confusa y dispersa en su finalidad. Es importante tener en cuenta que muchos de los modelos propuestos son resultado del análisis sísmico y no de observaciones de campo, con modelos de sedimentos siliciclásticos y adaptados para facies de carbonatos.

ESTRATIGRAFIA DE SECUENCIAS

EL agrupamiento de unidades sismoestratigráficas permiten la interpretación en términos de ambiente deposicional, fuente de sedimentación y ambiente geológico. La interpretación puede ser obtenida a partir de configuraciones de las reflexiones sísmicas y referida como patrones geométricos y de las relaciones de estratos en unidades estratigráficas. En el caso de la estratigrafía de secuencias tiene como principio base permitir describir un conjunto de rocas

como estratos que son depositados durante procesos de retrogradación asociados a trasgresiones, separados de intervalos de no depositación o de progradaciones durante las regresiones. Los límites de esos intervalos pueden ser trazados mediante la sismoestratigrafía, asociados a factores eustáticos (p.e. variaciones del nivel del mar), tectónicos o climáticos. Así, a partir del estudio de las discontinuidades, identificación de los aportes de sedimentos, unidades genéticamente correlacionables con herramientas sísmicas (Fig. 7), constituyendo la estratigrafía de secuencias.

[FIGURA 7]

La estratigrafía secuencial según los datos a analizar convergen en dos metodologías posibles, *driven-data* o *driven model based* referidas actualmente como empíricas e deductivas (Miall and Miall, 2004). En las últimas décadas modelos estratigráficos han sido divididos en sintéticos y analítico, según su objetivo. Los sintéticos envuelven la datación de modelos a partir de sucesiones estratigráficas locales, *i.e* la curva de ciclos globales de Haq *et al.*, (1987). Así, la edad de los depósitos se basa en sucesiones estratigráficas preservadas en la cuenca sedimentaria, predominando cambios eustáticos (*Eustasia*>*Tectónica*). Los modelos analíticos incluyen la litología como respuesta a las variaciones del nivel relativo del mar (*Eustasia*, *E*) y de la tectónica (*T*), (Posamentier et al., 1988). En este caso se emplea la sismoestratigrafía (o datos de afloramiento) para la interpretación y modelaje de las asociaciones de facies, permitiendo reconocer los límites que constituyen una cuenca sedimentaria. Se trata de determinar los materiales de aporte de la cuenca y el reconocimiento de las superficies de discontinuidades (*SD*) o las correspondientes superficies correlativas (*CC*) que corresponden a los cambios en las condiciones de génesis que afectan toda la cuenca, estas unidades son designadas por unidades genéticas.

El estudio de toda la cuenca debe ser iniciado con los aspectos de tipo analítico, intentando reconocer las unidades genéticas, siendo necesario de la datación de los diferentes eventos, como también sus límites, por lo que debe considerarse toda la información posible. La disposición de las unidades genéticas, es hecho a partir de los datos de campo, con el reconocimiento de las discontinuidades a través de observaciones de campo o de subsuelo (sísmica, registros de pozo o núcleos). La datación debe ser utilizada integrando bioestratigrafía con datos magnetométricos.

El análisis sintético, puede considerarse como una etapa posterior, donde son hechas comparaciones con estudios homólogos en cuencas vecinas, y con datos a escala global, para verificar la concordancia con eventos de tipo local, regional o global. Entre esas superficies, las discontinuidades son las mas fáciles para ser identificadas, desde el punto de vista sismoestratigráfico (Fig. 8), ya que se presentan con gran extensión, contraste, y en cualquier dominio (espacial, temporal o de Wheeler), por ejemplo en las márgenes de cuencas sedimentarias pasivas, donde cuenca adentro una discontinuidad pasa a ser una superficie de continuidad cuenca adentro (Catuneanu, 2006).

[FIGURA 8]

Sistemas sedimentarios

En márgenes pasivas tipo continental siliciclásticas, suponiendo un transporte continuo de sedimento, las variaciones de nivel del mar producen ciclicidad en los sistemas sedimentarios. El límite inferior es marcado por una discontinuidad donde son encontrados depósitos locales de relleno de valles y cañones submarinos. Primero está el abanico submarino como el primer sistema (Sistema regresivo de mar bajo), después se siguen los sedimentos progradantes y una cuña correspondiente al segundo trato de sistema. Este cortejo o sistema es separado por una

superficie transgresiva, depositando el trato transgresivo (secuencia retrogradante), terminando con la superficie de máxima inundación, pasando lateralmente a una sección condensada, sobre la cual se inicia el sistema regresivo de mar alto, terminando con una superficie de discontinuidad.

Para identificar los diferentes sistemas es necesario establecer:

- Posicionamiento dentro de la secuencia deposicional.
- Patrones de apilado de un conjunto de parasecuencias (Agradación, progradación o retrogradación – Fig. 8), esto basado en datos geofísicos (pozos, sísmica...) o geológicos (Afloramientos...).
- Asociación de facies sedimentarias (Afloramiento o núcleos)

Así un modelo deposicional podemos encontrar diferentes tratos o cortejos de sistemas, descritos a seguir.

Sistema regresivo de mar alto (*HSR*)

El sistema regresivo de mar alto es el conjunto de sedimentos depositados cuando el nivel de mar está alto, caracterizado por progradaciones (Fig. 9), por ejemplo, cuando el transporte es suficiente, corresponden al avance de sistemas deposicionales deltaicos sobre los de plataforma y de estos sobre los de talud .

[FIGURA 9]

Sistema regresivo de nivel de mar bajo (*LWSR*)

Este Sistema se inicia con el descenso brusco del nivel del mar la plataforma es expuesta (subaérea) en superficie, después con el descenso brusco del nivel del mar hay interrupción en la sedimentación y erosión, resultando en una discontinuidad sobre la que se depositan el sistema de nivel bajo, puede ser vista como un montículo en secciones de buzamiento con *downlap* bidireccionales. Este sistema pueden ser: 1. abanico submarino LSBF – acumulaciones derivadas de la erosión de la plataforma y de las partes altas del talud en fase de nivel bajo; éste se posiciona encima del límite de secuencia, con presencia de turbiditos que dan una apariencia de montículos, con geometría tabular desarrollados durante el descenso relativo del mar; 2. la cuña de nivel bajo, ocurridas en el mínimo eustático constituido por sistemas deposicionales regresivos, acumulados sobre el antiguo talud, en el final del descenso rápido del nivel de mar, cuando la línea de costa se desplaza por el talud superior. En la base del cañón se individualiza un complejo de canales con facies hemipelágicas e intercalaciones de turbiditos no relacionados con abanicos. Aquí aparecen sistemas de canales complejos con terminaciones en *onlap* y *downlap* hacia el límite de secuencias, *downlap* hacia el abanico submarino y facies de canal/levee, slump y slide de gravedad (Fig. 9). Para el caso de sistemas de valles incisos, son caracterizados por *onlap* progradantes laterales y geometrías sigmoidales.

Sistema transgresivo (*ST*)

Producida por la rápida subida del nivel del mar sobre áreas costeras, con depositación de sedimentos hemipelágicos sobre la plataforma, las condiciones, anteriores predominantemente regresivas, cambian y se instala un trato transgresivo, constituido por parasecuencias retrogradantes desarrolladas durante la subida relativa del nivel del mar. La superficie final del sistema transgresivo es la Superficie de Inundación máxima (*SIM*) en relación a la cual se

depositan la sección condensada. Presenta *onlaps* sobre la plataforma con formas de depósito tangencial, terminados en *toplaps*.

METODOLOGIA Y MODELO FINAL

La metodología para interpretación y modelamiento casi-3D parte de una malla bidimensional, con líneas de rumbo y de buzamiento (Figs. 9 y 10), de las cuales son extraídas informaciones de horizontes, superficies y secuencias, determinadas durante la interpretación de secciones transversales y de pozo. A esa interpretación se sigue la correlación con los pozos, para corroborar el amarre interpretación sísmica, la que puede llevar a la ejecución del registro sintético para la conversión Tiempo- Profundidad. En casos extremos donde no se cuenta con datos de pozos, pueden ser utilizadas las velocidades de procesamiento de las líneas sísmicas (conocidas como las cajas de velocidades), para efectuar un modelo de velocidades, el cual se constituye en la aproximación para llevar una configuración de 2D para un modelo 2.5D (casi-3D).

[FIGURA 10]

Este modelo permite establecer relación de profundidad y de posicionamiento de las diferentes elementos de las secuencias respectivas y obtener un modelo de estratigrafía de secuencias a partir de una configuración en profundidad. Para obtener un modelo en profundidad o tiempo, basado en datos bidimensionales, debe ser extendida la información desde cada una de las líneas sísmicas para fuera del plano, esto puede ser realizado con una función de velocidades creada con la interacción entre los datos de pozo y las cajas con velocidades sísmicas, p.e,

velocidades de procesamiento: apilado o de migración. El método básicamente permite extender y cambiar de dominio a través de las superficies que son las representaciones de los límites de secuencias. Conversiones de dominio y asignaciones de velocidades son hechas en los diferentes intervalos y aplicados a las interfaces de interés: Líneas de contorno, mapas e isopacos, modelo de secuencias pueden ser llevados del dominio temporal a espacial (Fig. 11) a partir de un modelo de velocidades variando linealmente con la profundidad.

[FIGURA 11]

Este modelo es inicialmente llevado desde el registro sísmico o la velocidad de migración o apilado, para la extensión lateral de los eventos sísmicos de buzamiento y de rumbo, los cuales van a presentar velocidades extendidas fuera del plano. Para efectos de simplicidad e por razones de resolución van a ser obviados las posibles inversiones de velocidad presentes. El modelo presentado corresponde a líneas de buzamiento y de rumbo localizadas en el offshore brasilero, con un pozo para amarre de la información, proceso de conversión y modelamiento.

Con la identificación de límites de las secuencias y la flatenización de las superficies encontradas, permite establecer una relación entre la dirección de depósito, previa selección de facies sísmica. La flatenización de horizontes (eventos), tomando como referencia uno de los horizontes como guía, permite el seguimiento de la dirección de depósito de los sedimentos, estableciendo su carácter progradante o retrogradante. Para este caso fue utilizado como referencia el horizonte qMi, a partir del cual fue llevada a cabo la flatenización de los demás eventos (Fig. 11). En esta etapa la resolución y detección conjugadas constituyen los factores preponderantes para el modelamiento sismoestratigrafía y de estratigrafía de secuencias, interrelacionados con las herramientas de visualización y computación, obteniendo un modelo en profundidad (Fig. 12) con las diferentes geometrías y terminaciones sismoestratigráficas, indispensables para determinar las características estratigráfica y de la estratigrafía de secuencias.

[FIGURA 12]

CONCLUSIONES

El objetivo de este artículo es hacer un tratamiento de datos geofísicos, especialmente secciones sísmica y pozos, implementando una interpretación sismoestratigráfica y de estratigrafía secuencial con integración de análisis de velocidades, por ejemplo, una función de velocidades para una configuración extendida de un modelo bidimensional para un modelo 2.5D. Todo este proceso es justificado para conversión de datos de un dominio temporal a profundidad, además de la interpretación de datos con técnicas de estratigrafía secuencial, que se constituye en una de las herramientas mas poderosas, que al ser implementadas a partir de datos sísmicos, permiten refinar y estipular modelos geológicos.

Cuando se definen la arquitectura geológica a partir de sus elementos geológicos, geofísicos o geomorfológicos, se hace necesario hacer el seguimiento de las variaciones en diferentes direcciones, vertical o lateral, consideraciones que no son hechas, regularmente se supone continuidad homogénea, o cortes transversales. Por lo que se hace necesario hacer una extensión con modelos que incluyan ese seguimiento, lateral y vertical, lo cual puede efectuarse con la funciones de velocidades en sentido del flujo externo a las secciones analizadas.

El modelamiento estratigráfico es basado en el análisis geométrico, de facies, sismoestratigrafía y la correlación con un pozo disponible para el área, datos que son limitados debido a la gran extensión del área y al poco muestreo, integrando datos de una malla 2D y un pozo 1D.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Federal do Rio Grande do Sul, por el soporte y la formación del primer autor durante la permanencia en el curso de doctorado en estratigrafía, y a la Universidad Nacional de Colombia por el financiamiento. A Schlumberger por el soporte computacional del modulo de modelamiento e interpretación Geofísica de Petrel 2008.1.

REFERENCIAS

ALVES, E. C. 1977. Estrutura rasa do talude e sopé da Margem Continental do Rio Grande do Sul e Uruguai. Tese de Mestrado. Inst. Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 77p.

BUTLER, L. W. 1970. Shallow structure of the continental margin southern Brazil and Uruguay. Geological Society of America Bulletin, New York, N.Y., V.81, p. 1079-1096

CASTILLO, L. A.; CRUZ, J. C.; GARABITO, G.; URBAN, J. 2002. Migração 2,5-D com amplitudes verdadeiras em meios com gradiente constante de velocidade. RBGf. Vol. 20. No. 1.

CATUNEANU, O.; MARTINS-NETO, M. A.; ERICKSSON, P. G. 2005. Precambrian sequence stratigraphy. Sedimentary Geology 176. p. 67-95.

CATUNEANU, O. 2006. Principles of sequence stratigraphy. Elsevier's sciences & Technology. British Library. 375 pp.

FONTANA, R. L. 1989. Evidências Geofísicas da presença de Hidratos de Gás na Bacia de Pelotas – Brasil. 1o Cong. Soc. Bras. Geofísica, Vol.1.

FONTANA, R. L. 1996. Geotêctnia e sismoestratigrafia da Bacia de Pelotas. Plataforma de Florianópolis. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS. 214p.

GONÇALVES, A.; OLIVEIRA, M. A. & OLIVEIRA, M.S. 1979. Geologia da Baía de Pelotas e da Plataforma de Florianópolis. Boletim Técnico da Petrobrás, RJ. 79:157-174.

HAQ, B. U.; HARDENBOL, J. & VAIL P. R. 1987. Chronology of Fluctuations Sea Levels since the Triassic (250 years ago to Present): Science, vol. 235, p.1156-1167.

- JAPSEN, P. 2006. Velocity-depth trends in Mesozoic and Cenozoic sediments from the Norwegian Shelf: Discussion. AAP Bulletin 90, No.7, pp.1141-1143.
- MALEHMIR, A.; THUNEHED, H. & TRYGGVASON, A. 2009. The Paleoproterozoic Kristineberg mining area, northern Sweden: Results from integrated 3D geophysical and geologic modeling, and implications for targeting ore deposits. *Geophysics* 74 (1), p.B9-B22.
- MARTINS, I.L. 1983. Modelo Sedimentar do Cone de Rio Grande. tese de Doutorado. Instituto de Geociências, universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 205p.
- MARTINS, L. R.; MARTINS, I. R. & URIEN C. M. 1990. Episódios Dinâmicos de Curta Duração na Margem Continental do Rio Grande do Sul: Registro e Importância. *Acta Geológica Leopoldensia* 29 (2), 9-22. Sao Leopoldo. Brasil.
- MIALL, D.A. 1997. *The Geology of Stratigraphy Sequences*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Germany. 432p.
- MIALL, A. & MIALL, C.H. 2004. Empiricism and model-building in stratigraphy: Around the hermeneutic circle in the pursuit of stratigraphic correlation. *Stratigraphy* 1, pp. 27-46.
- MITCHUM, M. R. Jr.; SANGREE, J.; VAIL, P. & WORNARDT, W. 1994. Recognizing Sequences and System Tracts from Well logs, Seismic Data, and Biostratigraphy: Examples from the late Cenozoic of the Gulf of Mexico. *In: WEIMER, P. & POSAMENTIER, H. W. (Eds). Siliciclastic sequence stratigraphy: recent developments and applications*. American Association of Petroleum Geologist, Memoir, 58. p. 163-197.
- POSAMENTIER, H. W.; ALLEN, G. P.; JAMES, D. P. & TESSON, M. 1992. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples, and exploration significance: *American Association of Petroleum Geologist, Bulletin*, vol.76, p. 1687-1709.
- POSAMENTIER, H. W.; JERVEY, M. T. & VAIL, P. R. 1988. Eustatic controls on clastic deposition I. Conceptual framework. *In: WILGUS, C.K.; HASTING, B.S.; KENDALL, C. G. S. T. C.; POSAMENTIER, H. W.; ROSS, C. A. & VAN WAGONER, J. C. (Eds), Sea Level Changes-An integrated Approach, Vol. 42. SEPM Special Publication, pp.110-124.*
- POSAMENTIER, H. W. & ALLEN, G. P. 1999. *Siliciclastic Sequence Stratigraphy: concepts and applications: SEPM concepts in Sediment logy and Paleontology*, vol. 7, 210p.

PORTO, R. A. 2007. Interpretação Sismoestratigrafica da Porção da Bacia de Pelotas que engloba o Cone de Rio Grande e a Avaliação do seu Potencial Petrolífero. Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Macaé/RJ.

SLOB, S.; HACK, R.; SCARPAS, T.; BEMMELEN, B. V. & DUQUE, A. 2002. A methodology for seismic microzonification using gis and shake – A case study from Armenia, Colombia. Engineering Geology for Developing Countries. South Africa, 16-20 September.

STORVOL, V.; BJORLYKKE, K. & MONDOL, N. 2006. Velocity-depth trends in Mesozoic and Cenozoic sediments from the Norwegian Shelf: Reply. AAPG Bulletin, V. 90, No.7, pp. 1145-1148.

TUCKER, M. P. & YORSTON, J.H. 1985. Pitfalls in Seismic Interpretation. Paul C. Wuenschel ed. Society Exploration Geophysicists. 50p.

URIEN, C. M.; MARTINS, L. R. & MARTINS, I. R. 2003. Paleoplataformas e Programação Deltaica do Neogeno na Margem Continental do Uruguai e Norte a Argentina. Gravel 1, 40-46. Porto Alegre - Brasil.

VAIL, P. R.; MITCHUM, R. M. & THOMPSON, S. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 4. Global cycles of relative changes in sea level, in C.E. Payton, ed, Seismic stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration: AAPG Memoir 26, p.83-97.

VAN WAGONER, J. C.; POSAMENTIER, H. W.; MITCHUM, R. M.; VAIL, P.R.; SARG, J. F.; LOUTIT, T. S. & HANDENBOL, J. 1988. An overview of sequence stratigraphy and key definitions. In: WILGUS, C. K.; HASTINGS, B. S.; KENDALL, C. G. S. T. C.; POSAMENTIER, H. W.; ROSS, C. A. & VAN WAGONER, J. C. (Eds.), Sea Level Changes – An Integrated approach, vol.42. SEPM Special Publication, pp. 39-45.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Límites o superficies geológicas que dan como resultado la impedancia acústica, en superficies estratificadas del subsuelo y son determinadas a partir de la relación de la reflexión con amplitudes y velocidades.

Figure 1. Geological boundaries surface giving acoustic impedance, into stratification subsurface, determined from the relationship between amplitude and velocity.

Figura 2. La imagen o sección sísmica puede considerarse una aproximación del modelo geológico, ya que la respuesta sísmica depende de las características estratigráficas, estructurales y geofísicas que afectan la señal (Modificado de Tucker and Yorston, 1985).

Figure 2. Seismic section considered an approach to the geological model, because the seismic response depends of the stratigraphy, structural and geophysical characteristics, that affect the signal (Modify from Tucker and Yorston, 1985).

Figura 3. Representación de un registro sísmico durante la etapa de adquisición.

Figure 3. Schematic representation from seismic record during acquisition stage.

Figura 4. Línea Sísmica de buzamiento interpretada con los diferentes horizontes, correspondientes a las discontinuidades contenidas en el área de estudio, además de una interpretación esquemática de una secuencia con los diferentes tratos de sistemas característicos.

Figure 4. Interpreted Seismic line (Dip) with different horizons, corresponds to the discontinuity into study area. Also, the schematic interpretation of sequence with their system tracts.

Figura 5. Modelo sísmico 2,5-D dominio CDP (*Zero offset configuration*), el plano central corresponde a la línea y las trazas (dentro del plano). Datos fuera de la línea sísmica no puede ser considerado, motivación para asumir un modelo 2,5-D.

Figure 5. Two and half dimensional (2,5D) seismic model in the CDP domain (zero offset configuration), the central plane is the seismic line and traces (into the plane). Information out of the seismic line could not considered, this is the motivation for 2,5-D model.

Figura 6. Modelo de velocidad obtenido a partir de registros (1D), a ser expandido para la sección sísmica e interpolación para configuración 2,5D a casi-3D.

Figure 6. Velocity model obtained from logs (1D), being expanded for seismic section and interpolation for two and half dimensional configuration (quasi - q-3D).

Figura 7. Imagen de sección sísmica buzante con la identificación de diferentes secuencias sísmicas limitadas por discontinuidades y sus concordancias relativas, separando procesos de retrogradación de no depositación o de progradaciones. Las flechas permiten identificar el sentido de la depositación (Progradación, retrogradación o agradación).

Figure 7. Seismic dip image with sequences, discontinuities and correlative concordances, separating retrogradational process from no depositional process. In the picture are identified the direction of deposition (progradations, retrogradations or aggradation).

Figura 8. Seguimiento lateral de los límites de secuencias interpretadas en una sección de rumbo y una sección buzante. La secuencia deposicional correspondiente a los estratos genéticamente relacionados, relativamente concordantes, limitados en el tope y la base por discontinuidades con su continuidad correlativas.

Figure 8. Lateral continuity of the sequence boundaries interpreted in dip and strike seismic section. Depositional sequences correspond to the strata packages that were related genetically, limited on the top and base by discontinuities with their correlative concordances.

Figura 9. Diagrama esquemático de un modelo de estratigrafía secuencial en secciones de buzamiento y de rumbo con los diferentes sistemas encontrados.

Figure 9. Schematic diagram from sequential stratigraphy model in dip and strike section with different system found it.

Figura 10. Modelo de secuencias con diferentes dominios (Temporal y espacial). El dato de entrada está compuesto por secciones (de rumbo y de buzamiento), a partir de las cuales son obtenidas superficies guías, que pueden ser correlacionadas cronoestratigráficamente, y asignarse una función de velocidad para llevar a otro dominio, y establecer horizontes flatenizados y ser interpretados como estratigrafía secuencial.

Figure 10. Sequence model with different domains (temporal and spatial). The Input data comprise seismic sections, that permitted to obtain guide surface, could be correlated chronostratigraphically, and assign it a velocity function for changing to another domain, stablishing flattened horizons and be interpreted.

Figura 11. Etapa de flatenización de superficies para análisis y definición de geometrías y terminaciones del modelo en la estratigrafía de secuencias.

Figure 11. Surface flattening stage for analyses and definition of geometries and terminations of the model into sequential stratigraphy.

Figure 12. Modelo final en profundidades con diferentes secuencias y geometría modeladas a a partir de datos sísmicos y un modelo de velocidades 2.5-D.

Figure 12. Depth model with different sequences and geometries from seismic and two and half velocity function.



Figura 1

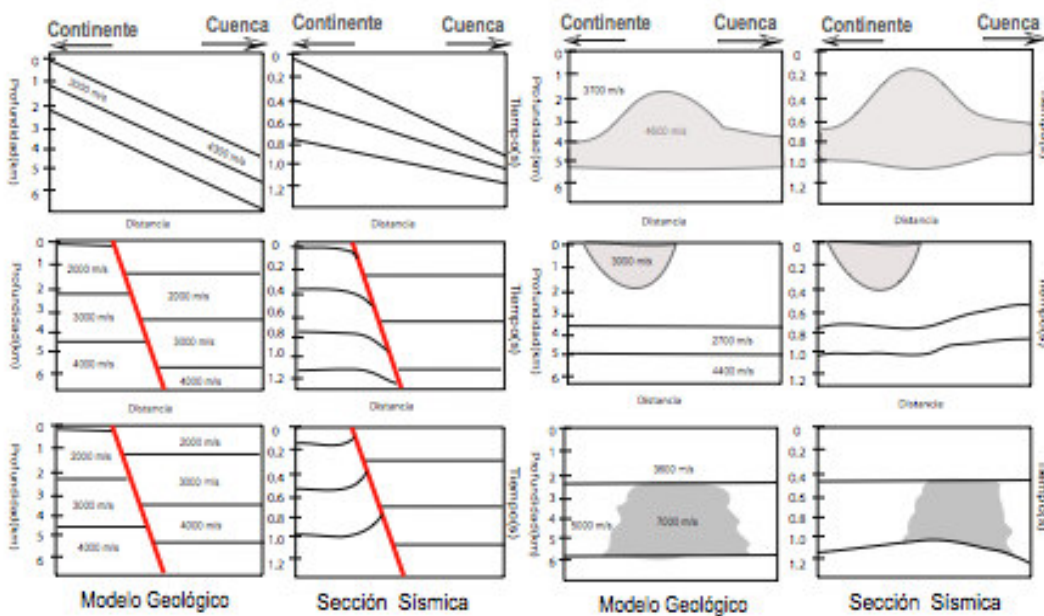


Figura 2

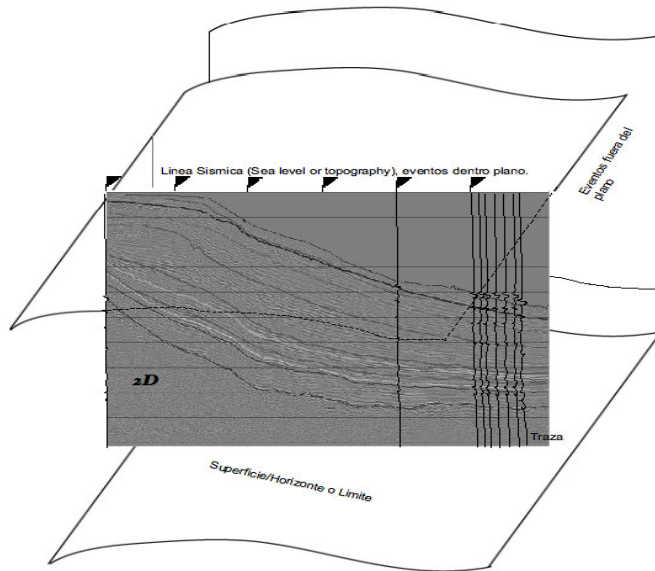


Figura 5

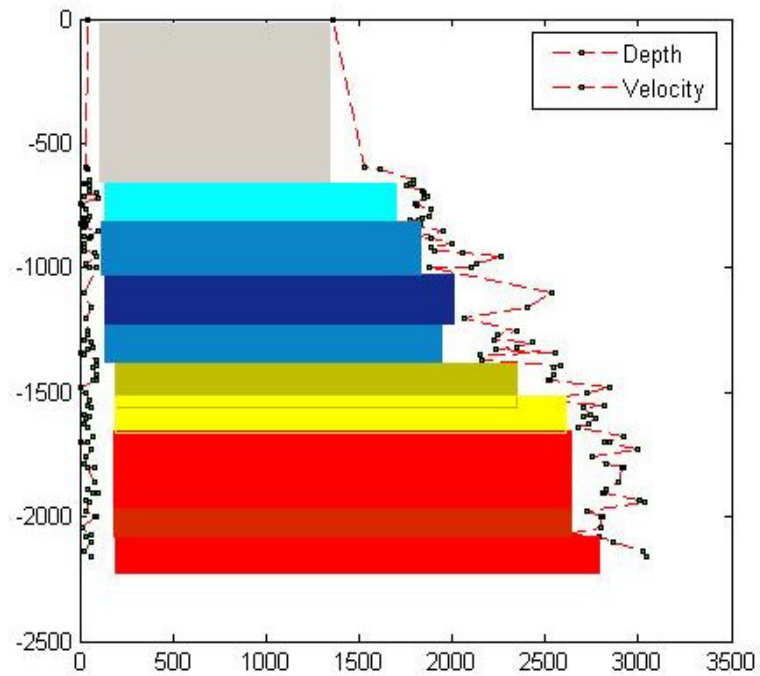


Figura 6

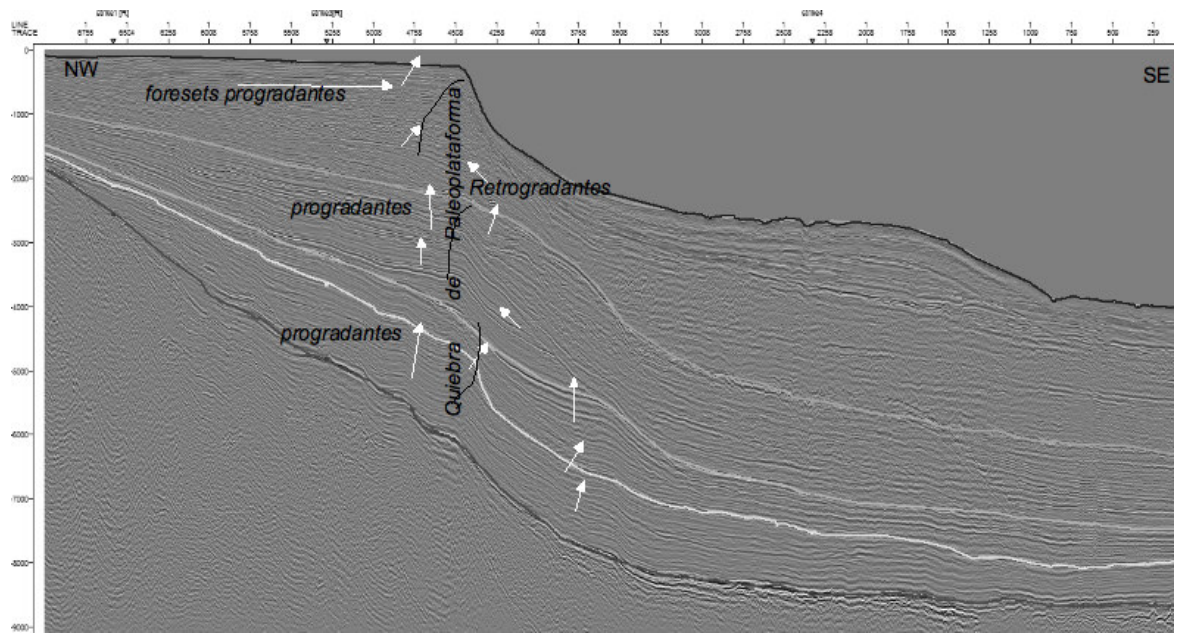


Figura 7

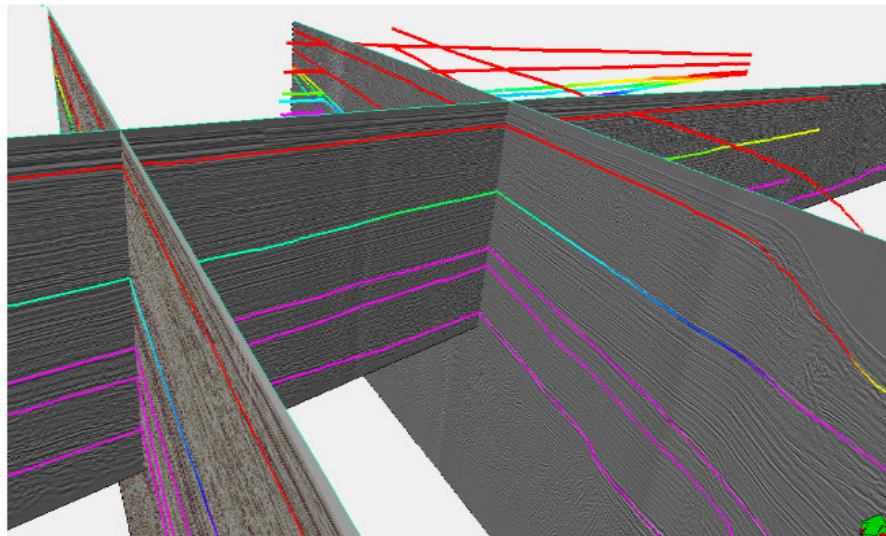


Figura 8

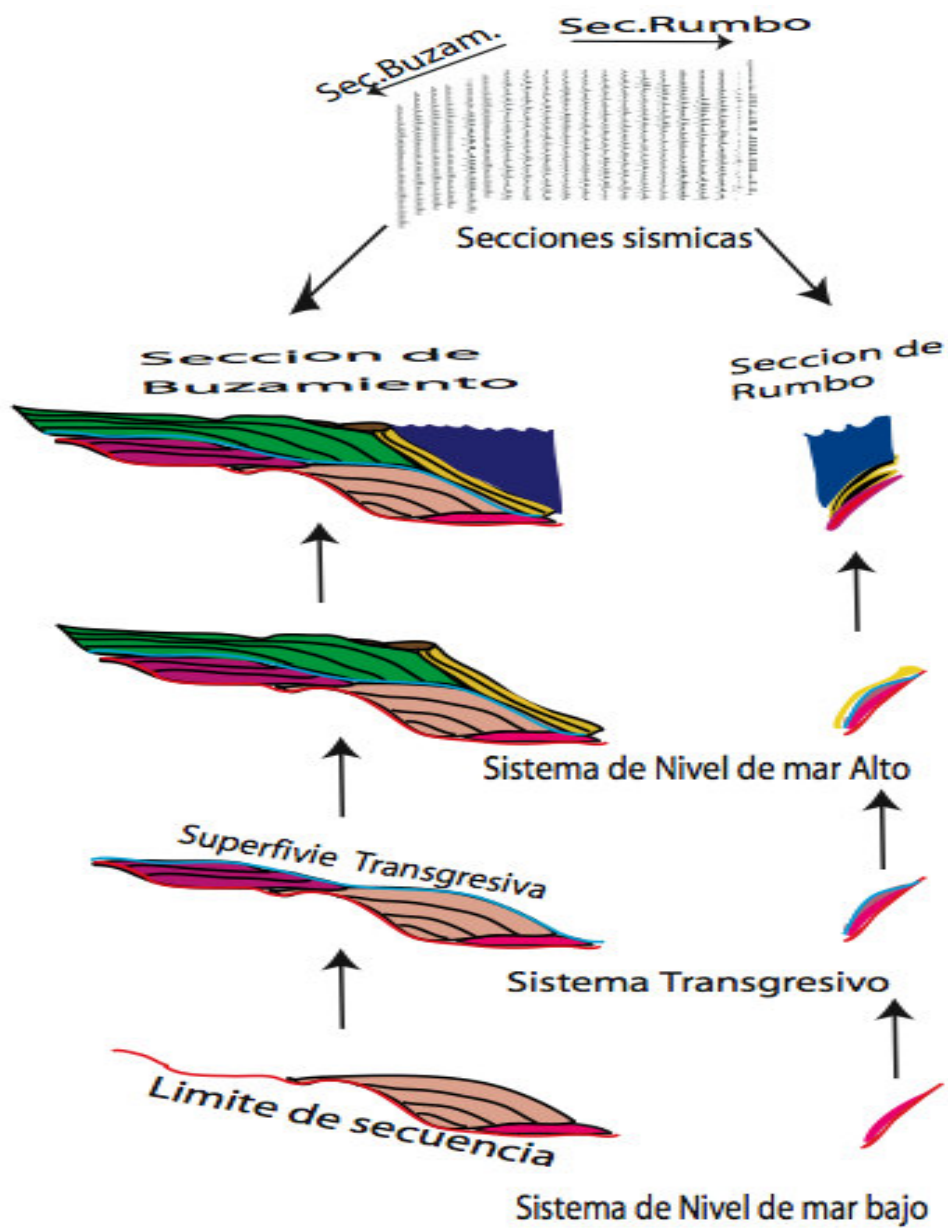


Figura 9

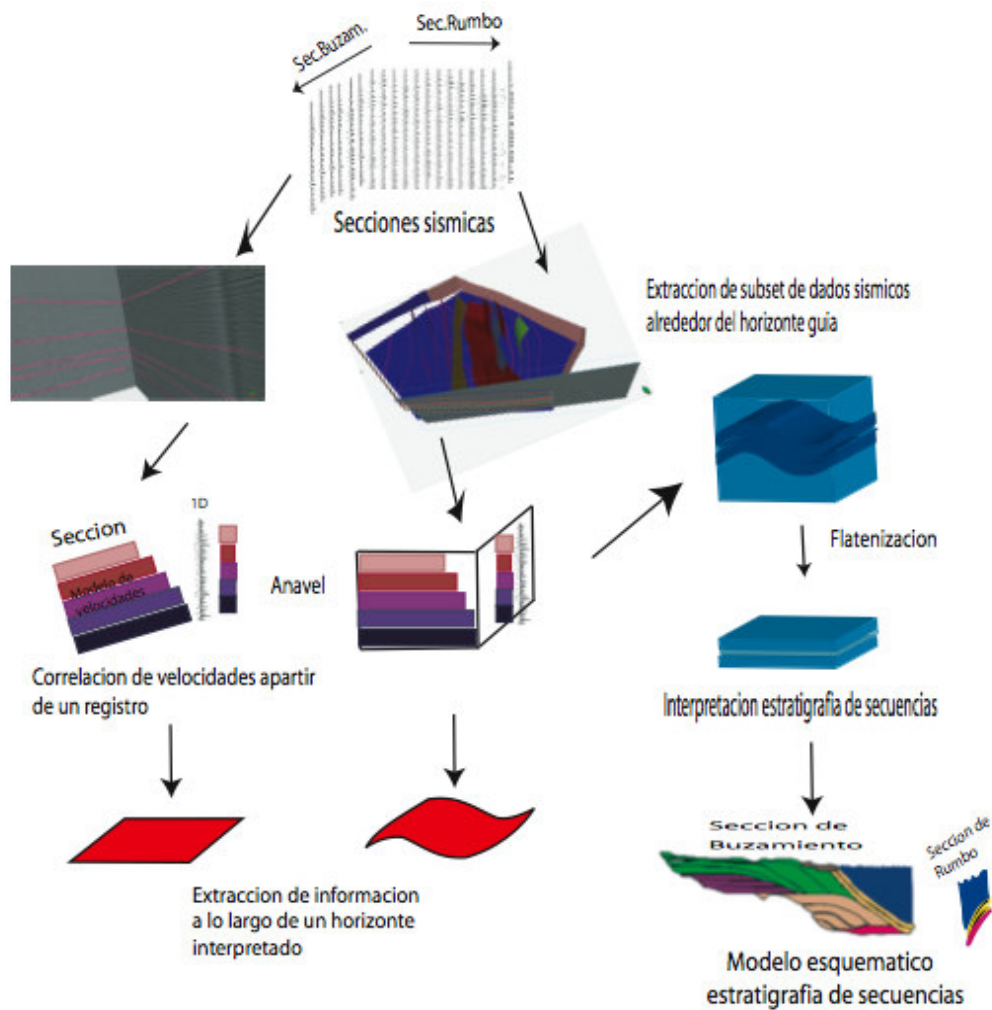


Figura 10

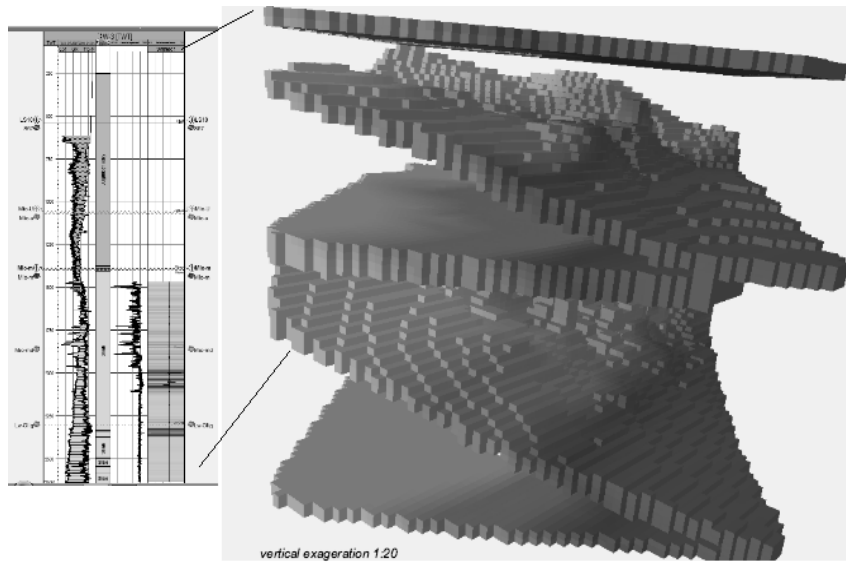


Figura 11

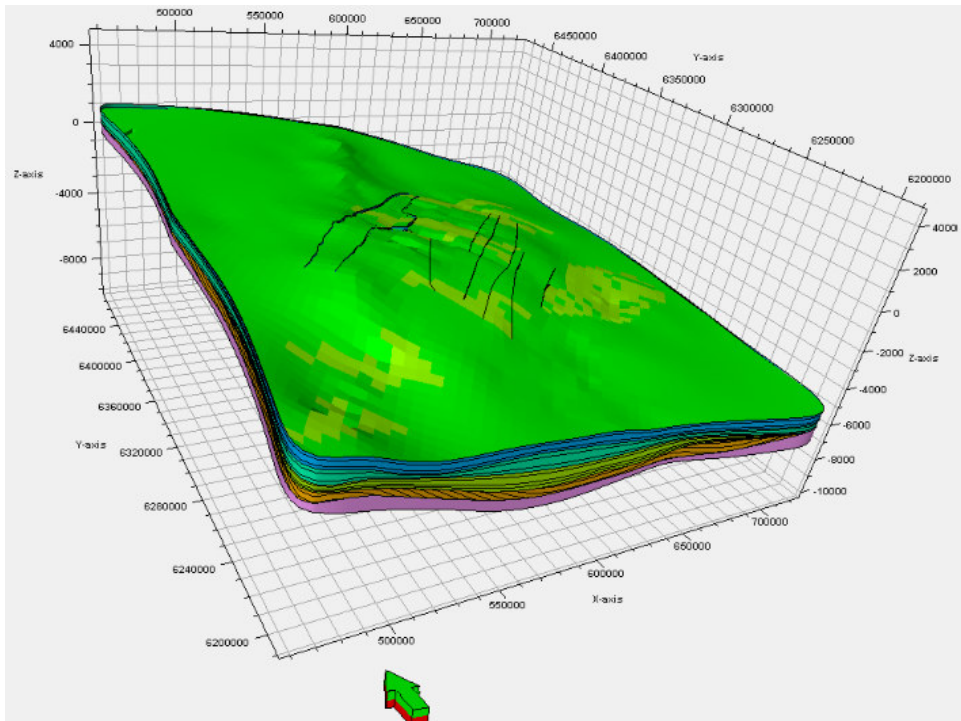


Figure 12

2.2 ARTIGO II. Tectono Seismostratigraphic model of Rio Grande Cone – Brazil: Seismic sequences.

Tectono Seismostratigraphic model of Rio Grande Cone – Brazil: Seismic sequences.

Castillo., L.L.A¹, Kazmierczak, de S. T²., and Chemale., Jr., F³.

¹ Professor, Geophysicist course, Geosciences Department - National university of Colombia- Bogota.

² Schlumberger Ltd, Brazil.

³ Professor, Geosciences Institute, Rio Grande do Sul Federal University, Porto Alegre – Brazil.

Resumen

Análisis sísmicos integrados con otros datos geofísicos han permitido el modelaje (Dominio del Tiempo) de diferentes rasgos en el *offshore* Brasileiro. A partir de la interpretación sísmica pueden ser extractados diferentes estructuras tectónicas y sedimentarias o geofomas como cañones, canales, *levee* naturales, contornitos, todos los aspectos son considerados con el reconocimiento de estructuras sedimentarias.

A lo largo de la plataforma y del *offshore* del sudeste Brasileiro pudo ser obtenido un modelo tectonoestratigrafico. Estudios de la Cuenca Marginal del Rio Grande del Sur hasta Tierra del fuego muestran el mecanismo de control dinámico de la geología estructural y estratigráfica.

La Cuenca de Pelotas se extiende por un área de 210000 km², comprende geofomas como el bajo de Mostardas, el Sinclinal de Torre, el Cono de Rio Grande, Bajo de Garopava, Terrazo de Rio Grande y el Alto de Florianopolis. Este trabajo presenta un estudio en el dominio del tiempo del Cono de río Grande, caracterizando sus principales estructuras tectónicas y estratigráficas que afectaron en gran proporción la mezcla de shales originados a partir de corrientes de fondo y procesos gravitacionales, como principales controladores de la geomorfología, que puede ser datada a partir del Neógeno.

Para el mapeamento y modelamiento del área se hizo necesaria la integración de herramientas litológicas y de estratigrafía de secuencias con el análisis sísmico, y el uso de herramientas sísmicas y de modelaje sofisticadas.

Palabras Claves: Sismoestratigrafía, Modelamiento, estratigrafía secuencial.

Abstract

The seismic analyses integrated to geophysical data have permitted modeling (time or depth domain) different features in Brazilian Offshore. It had been extracted from seismic interpretation that could be used to exhibit tectonic structures (faults, folds) and sedimentary structure or geomorphology geoforms as canyons, channels, levee, bottom-currents, all aspects would be considered with recognizing of sedimentary sequences.

Along of Southern Brazilian platform and offshore were obtained a Tectono-seismostratigraphic model from geophysical surveys. Studies of Marginal basin from *Rio Grande do Sul* until *Tierra del Fuego* showed dynamic control mechanism of stratigraphy and structural geological.

The Pelotas Basin cover a larger area (210000 km²) comprised by some features as Mostardas Low, Torres synclinal, Rio Grande Cone, Garopava low, Rio Grande Terrace and Florianopolis High. In this job could be made an analysis in time domain of a geomorphology body knows as Rio Grande Cone. It had been characterized by structural and sedimentary architecture that affected a high rate of shale mixtures formed on gravity and bottom currents, the principal control in the geomorphology had been dated since the Neogene.

For the mapping and modeling will be required to work with sequence seismic support through knowledge of the relations between litho and sequence stratigraphy, together with their integration into sedimentary analyses. Geophysical technical and attribute analyses permitted produce mapping or modeling geological for this study that incorporate sophisticated interpretation methods and tools.

Keywords: Seismostratigraphy, Modeling, Sequence stratigraphy.

Introduction

The Pelotas basin had not been affected by strong tectonics episodes since of Cretaceous period until the Recent. 2D seismic interpretation on section along surface exhibit the presence of some paleo-shelf that includes incision that cut the slope sea bed. Tectono-seismostratigraphic analyses permitted delineate and describe some geological aspects in subsurface.

The geological mapping represents a grid as near as an acquisition scale to the possible sedimentary and stratigraphy characteristics from study object. The first architectural stage offers synthetical model that comprise lines

times (horizon) picking, map conversion and isochrones that filling facies of model. By mapping it is necessary delineate and correlate boundaries sequences, markers, horizon, isochrone maps, surfaces (erosional, depositional) faults and sedimentary bodies. In this preliminar academic study will be documented a 3D model obtained from seismic sections in the Rio Grande Cone.

The seismostratigraphy had grown up since develop of acquisition and processing in the exploration industry. Then loading, processing, visualization and modelling had permitted manipulated a vast size and format data, creating model with a high quality and quantitative. Model could change from 1D/2D, 2.5D to 3D (4D). The first concepts related with

seismostratigraphy interpretation made reference to the geometry and stratal units (chronostratigraphic unit referred like sequences), the first step, is define the unconformities boundaries and then, recognize the unit according facies, seismic expression and attributes analyses.

Though seismostratigraphy and sequential stratigraphy had been growned, the last decades a lot of applications methods, terminology and concept permit confusing. For that the most important is refer the last stratigraphy sequences studies that included a relationship between different geosciences discipline like a context interdisciplinary that integrate date, target area and the different applications (Catuneanu, 2006). Geomorphology, sedimentology, geophysics and computational discipline comprise powerful tool that would be integrated for obtain an 3D approach using a driven-model method that permit generate a more realistic feature of the subsurface geomorphologic body.

The seismostratigraphic interpretation on the Cone of Rio Grande could be made due their location into the basin. With the object of divide the deep sedimentary package in similar form to Pelotas Basin sequences parts, would be made a driven-model from a sequential stratigraphy classification. For defining seismic

terminations (Mitchum *et al.* 1994).

On the southeast of Brazilian one of the most relevant geform is named as Rio Grande Cone. The Rio Grande Cone (RGC) survey area from 170km² is localized into the Pelotas Basin on southern of South American continent (Figure 1), corresponding to a semicircular-shaped noticeable feature of the subsurface landscape, comprising a transition from shelf to slopes offshore environments with great shale supply, it have as its source the highlands and the Brazilian craton.

Localization

On the southeast of Brazilian one of the most relevant geform is named as Rio Grande Cone. The Rio Grande Cone (RGC) survey area from 170km² is localized into the Pelotas Basin on southern of South American continent (Figure 1), corresponding to a semicircular-shaped noticeable feature of the subsurface landscape, comprising a transition from shelf to slopes offshore environments with great shale supply, it have as its source the highlands and the Brazilian craton.

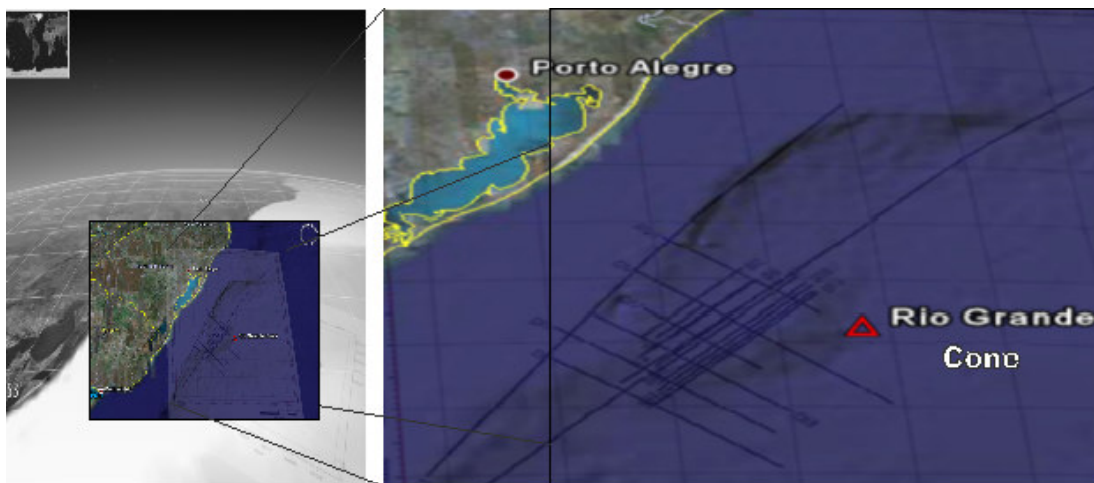


Figure 1. Localization of Rio Grande Cone within the Pelotas Basin – Brazil.

Seismic Data

The data correspond to 2D migration time section (3577 km of offshore seismic data) loaded, processed and interpreted

commercial interpretation, visualization, modeling module software (Petrel 2008) and open source seismic interpretation software (OpendTect V3.03e). The tectonostratigraphic study include identification and portray the

main temporal horizon, then could be delimited and describe the second order stratigraphic sequences. Tectonic and stratigraphic mapping, including structures correlated with chronostratigraphic framework. The dominant frequency could be obtained from attributes analyses, i.e. instantaneous frequency map, where exhibit a dominant frequency of 30-35Hz (Figure 2), the slowness on the area is 90 μ s/ft. Comprising a sample rate of 4ms, 5 to 10s record length and windows time analyses of 28ms. Considering geophysical parameters on Basin Pelotas with average velocity 3050 m/s and frequency of 30Hz, wavelength could be obtained. The expression for wavelength is given by:

$$\lambda = V/f. \quad (1)$$

Then, $\lambda = 3048\text{m/s} / 40 \text{ Hz} = 76,2\text{m}$, by the $\lambda/4 \Rightarrow 76,2 \text{ m}/4 = 19,05\text{m} \Rightarrow 62,5\text{feet}$. The calculations determine that the thickness obtained for a minimum layer is between 20 to 100 feet (7 to 30m), otherwise is not tuned. The limit of seismic resolution in section data could mean the different between we can know about subsurface and another direct methods with higher resolution.

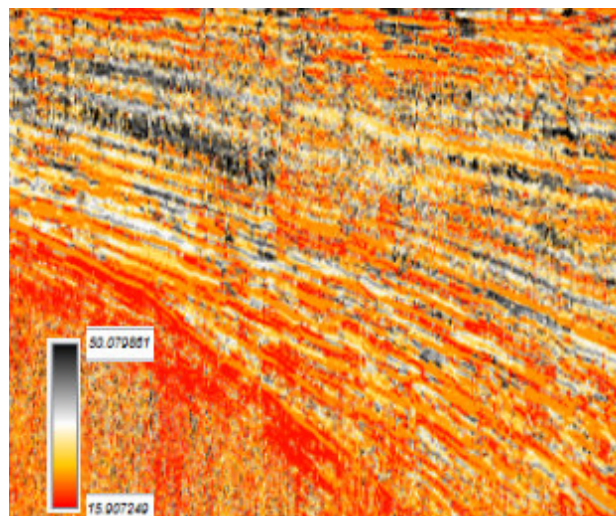


Figure 2. Attribute seismic analyses for seismic section Image to determine parameters for quantify geophysical information.

Attribute Analysis

Seismic attributes are calculated from at least two trace input and provide information about lateral variations in set data. Attribute is not restricted to structural and stratigraphic analysis; it had been used to estimate petrophysic properties and geomorphological elements with the well data. The seismic data has the advantage by the fold and areal extension and depth researching. Seismic data

permit extract information from *seismic attributes* (Taner *et al*, 1979).

Historical developments of tool and technique include sequence stratigraphy interpretation, acquisition evolution going through processing, interpretation and modeling tools, i.e. seismic stratigraphy, attribute analysis, and seismic geomorphology could be considered the most actual tool for geological and geophysical model using seismic data (Figure 3).

All information extracted from seismic data is known as an attribute and the combination of it depending of the objective, their quality and interpreter experience. Attribute is used to improve subsurface image for delimit horizon, zone, seismic facies, geometry, increasing the ability to define structural model and stratigraphy analysis.

Seismic attributes application

The seismic attributes were introduced in the seventy decade, first as display form, and testifying as different derived measures of the seismic, turning into an analytical tool of prediction and lithologic characterization. Although, some direct relationship has not been established between the attributes and the geological characteristics of the Earth, almost all describe several uses of seismic attributes as discriminator with classes classification purposes.

Recently the seismic attribute application includes surfaces, horizon, geomorphology mapping, sequence stratigraphic interpretation, modeling subsurface and geobody information where they had been accepted as tools for geomorphic modern survey knowledge through interpreting old strata and process (Carter, 2003; Posamentier and Kolla, 2003; Posamentier, 2003). It involved different image technology, i.e. multicomponents, visualization, blooming image for laser, etc. Now it is possible mapping landscape and continents through the time in subsurface. In that case, the seismic geomorphology when it is integrated with attributes, it constitutes a strong tool for understanding the basin evolution. Then seismic geomorphology is an evolving field, building on the historic approaches of seismic stratigraphy, sequential stratigraphy, fluvial geomorphology and three dimensional modeling.

Seismic attribute are used in structural, stratigraphy and geomorphological interpretation. Usually, attributes had being using for determine reservoir properties, their lateral continuity and the better resolution with the sophistication of computational system that permit a more use of attributes into different seismic sequences.

In the beginning instantaneous attributes were the first introduced, calculated line by line, but at the present time the term includes any measured it specifies of the geometric characteristics, kinematics, dynamics or statistics of the seismic data (Taner, 1979).

The attribute can be divided in several categories, according to the seismic characteristic: geometry, cinematic, dynamic, statistical, being classified: instantaneous, on the task can de Instantaneous attributes: based in Hilbert Transform and calculate trace to trace, being considered that registered trace in a receiver the real part $R(t)$ of the complex trace.

In the moment do not exist a unique attribute classification, but one of the most complete is the Taner classification with pre-stack and post-stack seismic attributes (Taner, 1992). Being the last one the best for analyses of big data Volume, and classified in instantaneous for each trace or interval sample attributes (horizon and windows).

On the seismic images processing local seismic attributes analyses (LSAA) is being used to measure seismic signal characteristic in the neighborhood of each point. This technique found applications in different steps of multicomponent seismic image registration (Fomel, 2007).

Attributes could be used for delineate structural (Dip/azimute, ant-tracking, dip deviation, local structural dip, structural smoothing, variance, etc), stratigraphic (iso-frequence component, local flatness, acoustic impedance, etc) or geomorphological features (gradient, coherence, strata slices attributes, horizon slice attributes etc), (Figure 3 and 4).

Coherence attribute measures the similarity of a reflection attributes and seismic facies pattern. trace to its neighbors and display The most useful attribute cycles consist of discontinuities, faults and channels (Marfurt *et* changes in seismic often change upwards from *al.*, 1998). laterally continuous reflections, instantaneous

The key criterion that guides the interpreter in amplitude and frequency. these setting is the repetitive cycles of seismic

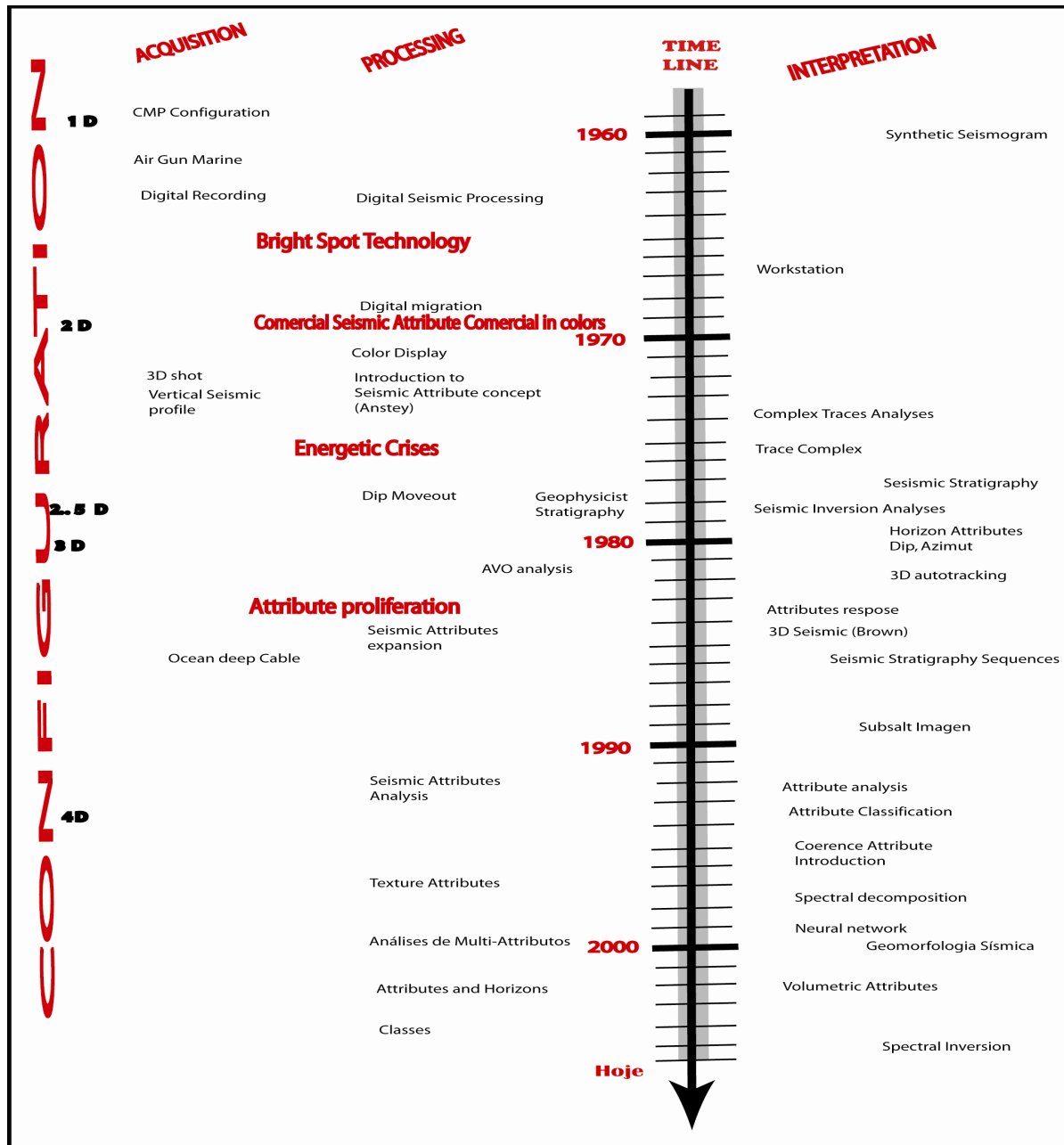


Figure 3. Historical development of the seismic method: acquisition, processing, interpretation and modeling (Adapted from Liner, 2008; Chopra and Marfurt, 2005 and Friedman, 1998)

Some attribute analyses were applied to seismic lines from Brazilian offshore. The most important feature is the lineaments and fractures found by local flat analyses and relative acoustic impedance that showed normal faults affecting the sedimentary package into the Rio Grande Cone.

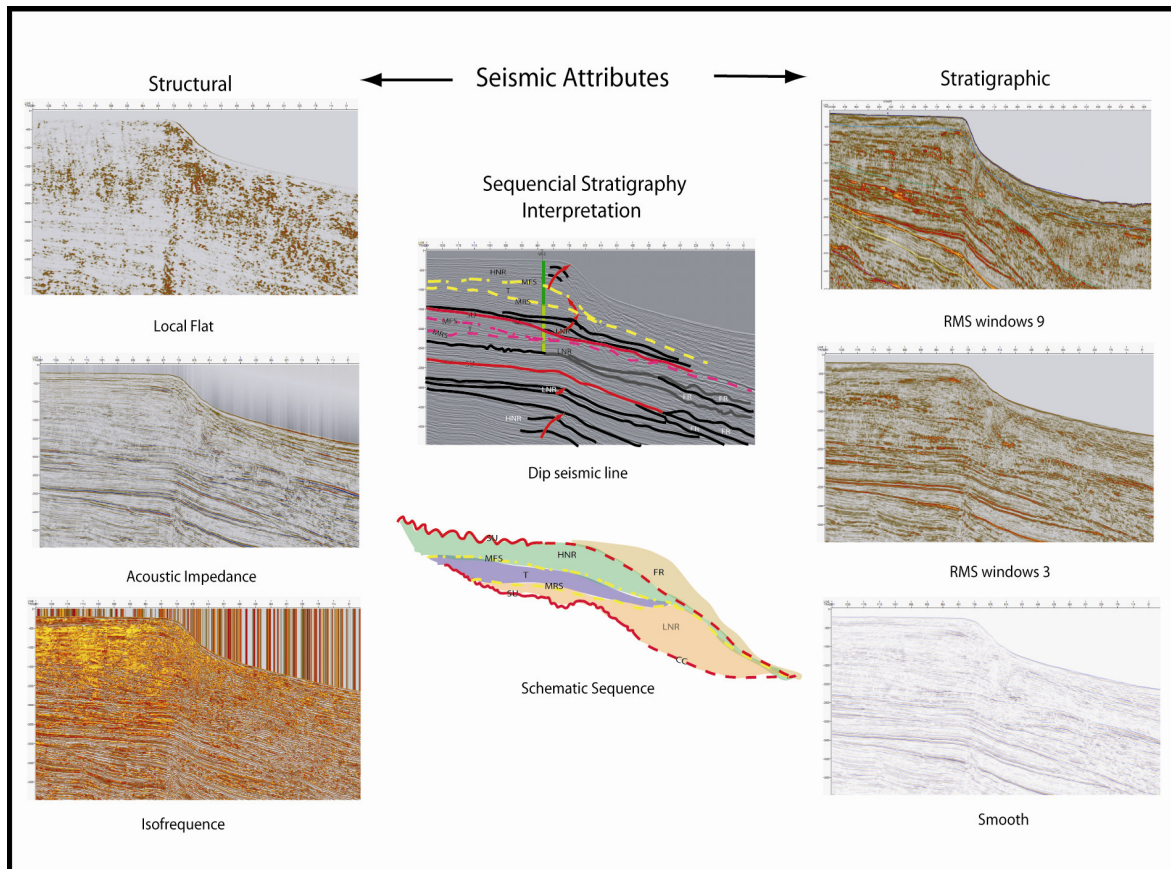


Figure 4. Seismic Attribute analysis and seismic stratigraphy interpretation with display for dip seismic line.

SEISMOSTRATIGRAPHY AND SEQUENCE STRATIGRAPHY OF THE RIO GRANDE CONE

Rio Grande Cone is located in a passive margin basin where have been found several progradational systems supplied by fluvial and cratonic sediments influenced by sea level fluctuations. Seismic section permits structural,

sedimentology, geomorphology and features delineations then could be determined structural compartmentalization and stratigraphic sequences.

Tectonic structures description

The southeast area of Brazilian offshore comprises sequences that have been affected by rifts faults giving half-graben configuration on the basal sequences. The Rio Grande Cone comprises pos-rift sequences. Post-rift stage

starting during Aptian, underdevelopment adiastraphic tectonic, affecting basal sequences: Aptian-Albian sequence. Above these sequences were laid more that 3000 m belonging to Rio Grande Cone, structural sequences that had been influenced by tectonic and sedimentary structures. Relevant structures correspond to system faults that were active until Pleistocene -late Wisconsin- (Alves, 1977). In structural point of view, fault systems correspond to the most relevant factor that affects clastic sequences. The first one domain contains faults system with listric faults, including thrust, detachment flat and decollatment plane. Those structures are characterized by normal faults that were originated by distensional events generating displacement of blocks located on the proximal area with normal faults (Northeast-Southwest trends and vergence to the Northwest), on the

distal section of the cone there are some little faults that change their style being presenting inverse faults style located to the final section (Figure 5).

Studies determinate that several lineaments and faults were originated by fluids decompactation, and incident on generation of scape fluid structures visible on the sea bottom surface. In this article the Rio Grande Cone constitute a sedimentary package including geofoms characterized by the result of channel system morphology, sediment waves and contourites that had been affected on the upper sequences by fault systems from distensional events that originated normal faults on the north and inverse faults on the south.

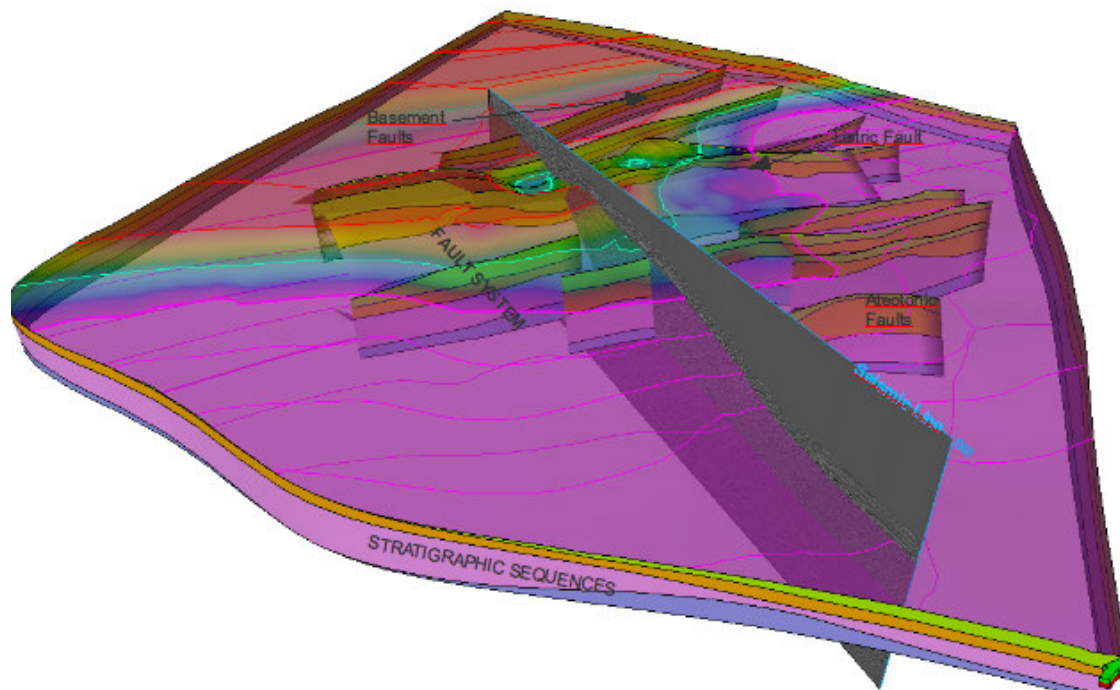


Figure 5. Three dimensional model of the Brazilian southeast, located in the Rio Grande Cone. The upper and intermediate sequences and faults system are delineated from seismic data interpretation.

Sequence stratigraphy on Rio Grande Cone

Sismoestratigraphic interpretation Pelotas Basin include at least sixteen sequences (Butler, (1970); Fontana, (1996) and Porto, (2007)), the

cone area has morphologies and intern structures described with geophysical methods, for instance refraction seismic. Refraction method revealed along to Rio Grande do Sul

and Uruguay continental margins a wedge with and another flux) modeled by bottom current. 1.8 km/s (Alves, 1977). The wedge Fontana reports hydrate gas presence into the sedimentation was initiated since Middle Pelotas Basin (Fontana, 1989). After, he Miocene through the Pleistocene. Stages of described the geotectonic and deposition and erosion, owing to eustatic sea sismoestratigraphy of the Pelotas Basin and level fluctuations, caused the development of Florianopolis Shelf (Fontana, 1996), divided the four sedimentary sequences. The distribution of basin in 17 second order stratigraphic the maximum center deposition suggests a sequences. migration of the source towards continent, maybe due marine transgression (Alves, 1977).

Another sequence were established with reflection seismic being founded eight sedimentary sequences, and presented an architectural tectonosedimentary sequences for the Pelotas Basin and Florianopolis shelf (Gonçalves *et al.*, 1979). Martins (1983) characterized Rio Grande Cone like a deep sea feature of sedimentar origin supplied by *Rio Grande do Sul* highlands, with progradational deposition and gravitational process (turbidites

Rio de la Plata and Rio Grande Cone result of Maastrichtian/Danian on South American Atlantic continental transgression, continental shelf and depression flooding by the sea, are typical examples of geofoms observed on Uruguay and Brazilian platform. In this situations highstand progradation generation on shelf could be identified on seismic sections (Figures 6 and 7).

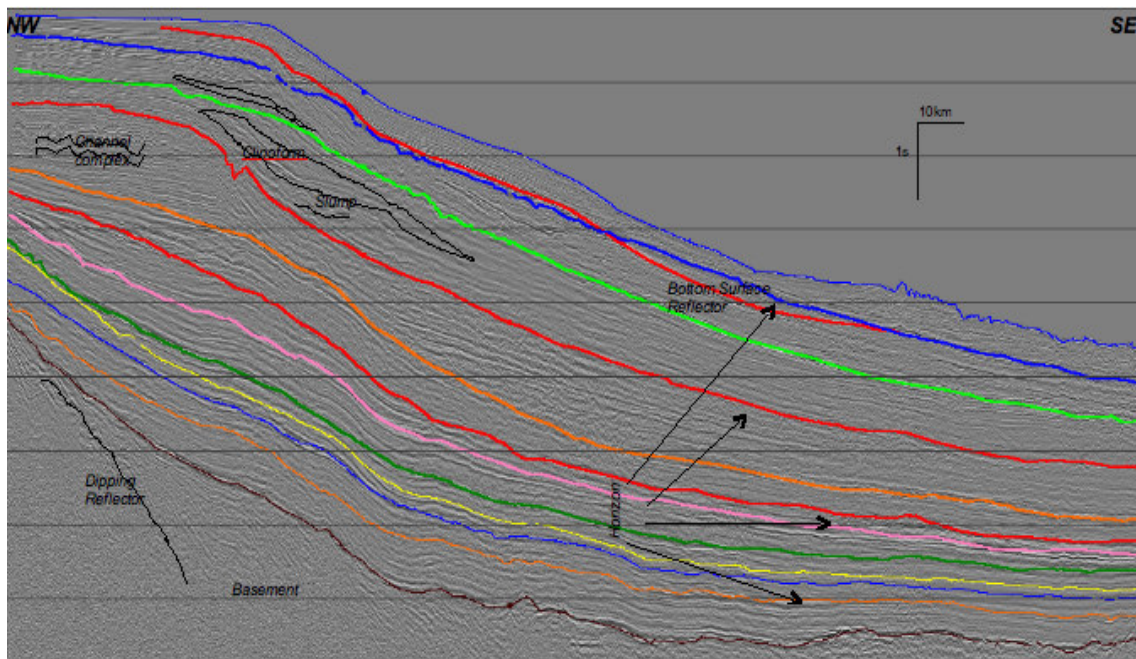


Figure 6. Seismic dip line (DI) interpretation with geological and geophysical features.

Rio Grande Cone is the most remarkable physiographic feature in the Pelotas Basin, a geoform with 900m of sedimentary package thickness, formed during Upper Miocene and Lower Pliocene, and later sequences deposited over the distal portion. On Pleistocene (Middle and late Wisconsin) sedimentation rates 20 cm/10³ years, and lowered sea level prevailed. The shelf edge suffered erosion resulting in the truncation of the prograding sediments. The eroded sediments fed it via suspension or gravitational process, this was four times greater than Holocene rates.

Seismostratigraphy and sequence stratigraphy description

For describe Rio Grande Cone is important the knowlegment of Pelotas Basin tectono-stratigraphy evolution. It could be split up in: pre-rift that comprise Paleozoic Parana Basin sediments, sin-rift with Neocomia basalts belong to Imituba Formation (Eocene/Oligocene), Barremian Sequence (Cassino Fm), Continental sequences and post-rift (drift), (Figure 7).

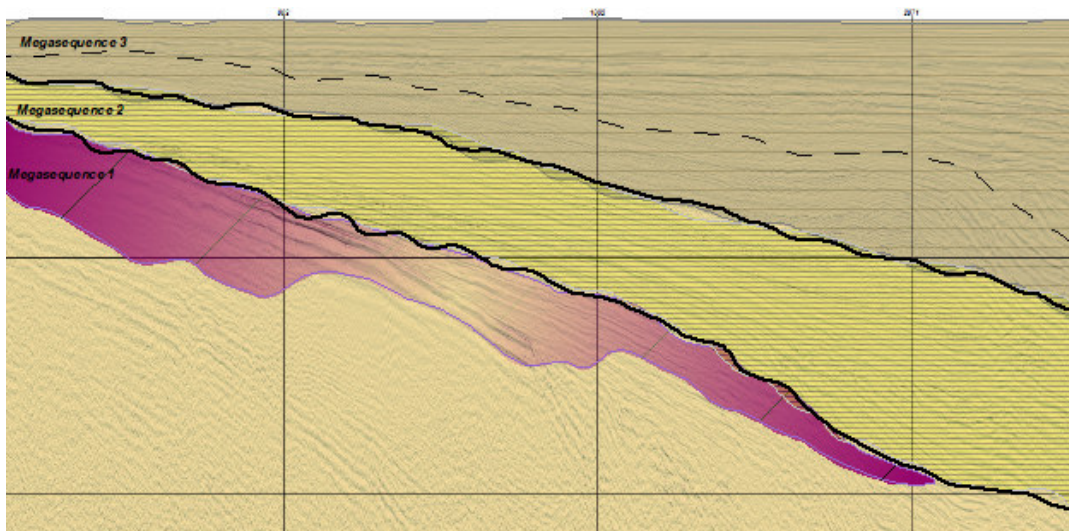


Figure 7. Tectono-estratigraphic megasequences (MegaS1 to MegaS3: MegaS1-3), associated to Pelotas Basin evolution comprising since Paleozoic to Recent.

Lower Sequences

The lowermost sequence was deposited on the basement (Figures 7 and 8). In this area is possible identify dipping reflectors in the proximal sector, while diffuse reflections to the distal basin. Lost on the shapes and geometry reflections could be owing to sedimentary package, deeper and few images that could not get acoustic contrast to respond its impedance.

Lower Sequences (one to three sequences) consist of inland deposits with transgressive expression and found above Lowstand, Transgressive and Highstand system Tract. The sequences are delimited by unconformities or correlatives conformities and comprise strata genetically correlated that had been deposited between lower eustatic inflection points. These sequences could be denoted by free reflection changing to chaotic configuration toward offshore.

In this interval are identified at least three second order sequences (Fontana, 1989; Porto, 2007). The lower Sequence fills half grabens and overlies the dipping reflectors. The reflectors are few continuous with variable amplitudes. The horizon could be manifest by erosional truncation landward, and conformity correlate seaward. After the first sequence, layers overlie with parallel, continuous reflectors, with the genetic stratigraphic characteristics (Fontana, 1989; Porto 2007). Those sequences (four to eight) correspond to transgressive with onlap inland and downlap basinward. All sequences permit identify montiforms with bidirectional downlaps that represent the lowstand fan unit deposited in the deeper basin, being the first lowstand stage, in a rapid decrease on eustatic curve inflection. On paleoslopes found few continuous reflections and variables amplitudes. Middle sequences with erosion surfaces changes from Cretaceous to Tertiary (Figure 8).

Middle Sequences

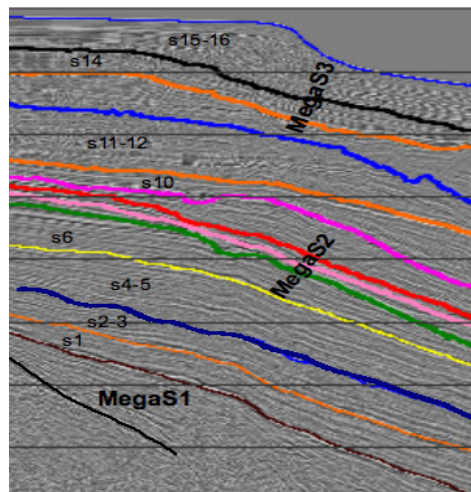


Figure 8. Sismostratigraphic identification of the different sequences, identify by boundary surface. It has been included between three lower order Megasequences (MegaS1-3).

Upper Sequences

By considering geological mapping comprise sequences affected by different structural styles and stratigraphy dominated for facies variations, supplied by high quantity of sediments. Upper sequences (nine to sixteen) belong to Rio Grande Cone, being characterized by changes from transgressive to progradant sequences. Transgressive and regressive features result of the sea level fluctuations with occurrences from Aptian. In Holocene

Transgression, the southeast continental margin has not received any significant quantity of terrigenous supply. Two processes are still active: widespread pelagic and sedimentation geostrophic. Contour current activity development along lower continental rise. Bottom-currents deposits result from along upslope flowing processes, while gravity deposits results from downslopes process. Characteristic on recent drift sequences, identify slopes features deposited by bottom-currents, slump and gravity deposits process (Alves, 1977).

On upper sequences seismic had been *et al*, 1980, 1990), presenting similar established geometries characteristic from geometries to the Rio Grande Cone. slumps lead to progradation on system tract, Sedimentary effects in the Paleocene cycles considering their instability bring about steep slope. With the decline plane by the sediment supply of sea level higher produce the flux of mass. The highstand is constant from Paleocene to Middle Eocene and Oligocene, through regressive intermittent cycles ended with Oligocene regression (This show hard layering, as result of paleoshelf). On *Rio de la Plata* regional Terraces an erosive surface covered by deltaic events until Upper Pleistocene (Martins

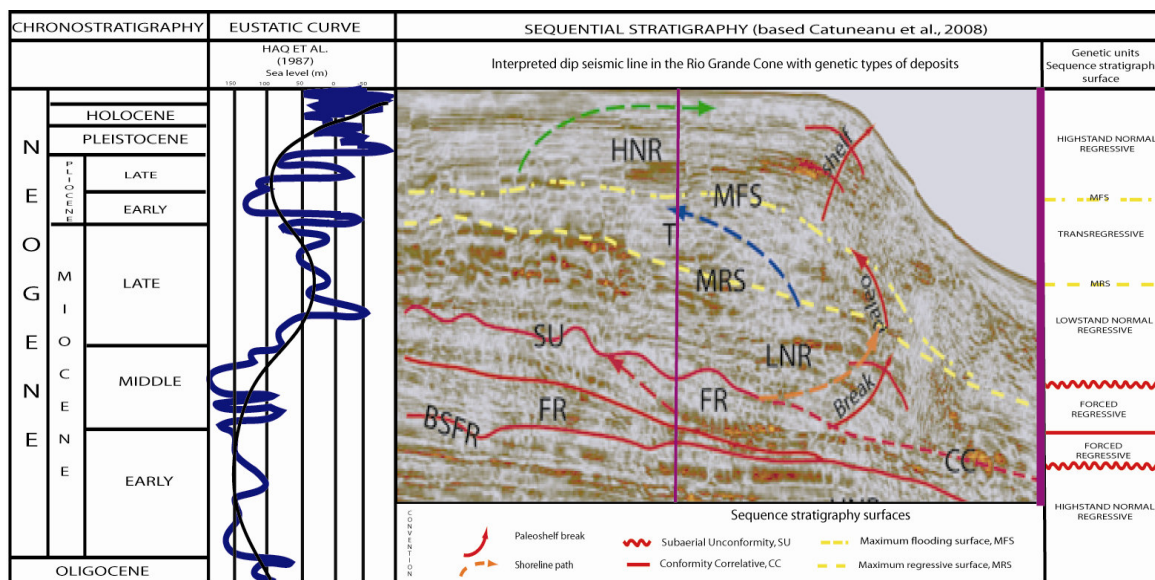


Figure 9. Haq curve with correlation of sea level variations and chronostratigraphy (Haq *et al*, 1987).

Rio Grande Modelling and Mapping

The picking boundaries and horizon tracing permitted construct a three-dimensional subsurface image of the Rio Grande geofom. Sismostratigraphic analyses boundaries sequence mapping on basal permit identify shelf with regressive progradational sediments. The sequences are comprised by sequential systems in a marginal sag type, since late Cretaceous, these correspond to Pelotas Basin sequences.

The semicircular-shaped plan-view morphology extends to the southeast and strike to the north. The recent sequences with thickness packages are divided by incision due faults systems and by the presence of geophisic anomalies, being a reflector that simulates the bottom surface (BSR). This reflector represents an answer to the high impedances caused by hydrate gas presence. Below 500ms, a system faults extends cutting all upper sequences. Near offset or proximal sector include some clinofom set has been separated by internal downlap surface and did not faulted.

Visualization and 3D modelling (Figure 10) has allowed system faults geometry to be defined, revealing details of normal faults and its process include fault propagation and could be interpreted like polygonal faults system due to contractions factors and y early fluid expulsion during possible burial, where compaction act in differents directions on clay rich sediments.

In the Cone of Rio Grande progradational layering lead continuous offlap, it evidence characteristics like continental slope, Paleogeno/Neogene Marginal Cone, and Progradant system, on the upper interval constitute recent continental Shelf (Urien *et al*, 2003). On the last stage and inferior Holocene sedimentary dispersion included erosive process, through submarine canyons and depth sedimentation.

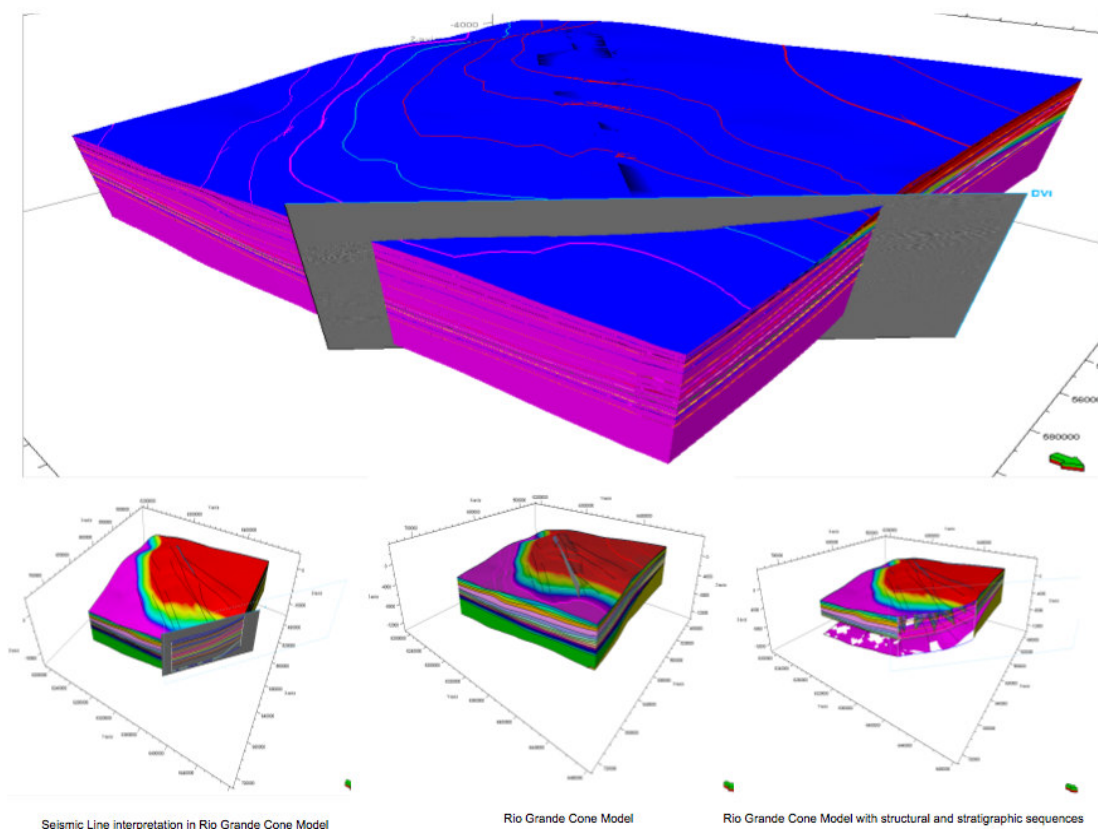


Figure 10. 3D Model obtained from seismic stratigraphic interpretation showing paleoshelf and several stratigraphic sequences belong to Pelotas Basin and highlights tectonostratigraphic features of the Rio Grande Cone.

Eustatic changes are present in a decrease grade during Neogene. Progradant and alternance with Highstand and Lowstand could be defined for Miocene and Pliocene. That effect is more related to eustatic episods with sea level changes that tectonic controlled by Anden orogenic pulses.

Conclusion

The feature named Rio Grande Cone could be defined as a huge semicircular shape geological body with an thickness sedimentary package of

sediments. It was principally a shale geoform, extends 1700ms (ca. 950 m).

The area is the most affected by *structure*. It would be considered because affect a thickness

of potential sedimentar package, while rift structures located below of it comprise sequences affecting basal strata on to regional area.

The Rio Grande Cone is overlying on older inferior and middle sedimentar sequences that constitute sequences of Pelotas Basin. The cone comprise the younger sequence of the basin, being major order sequences division since middle and upper lag.

The three dimensional model comprise an academic research of seismic data, applicated to generation of visualization and interactive understanding that will permit a paleogeomorpholgy reconstruction of Rio Grande Cone, that constituted an important features on offshore of the Brazilian southeast.

In this paper is presented a methodology and a sequence typical of seismic interpretation with the aim to show the importance step to step for a best visualization and modeling interpretation with seismic, important in the evolution of stratigraphy in especial sequential stratigraphy with computational tools. By the way, is important call attention the use of the computational technology like a tool for the interpretation and visualization of data. Also, to recover the coherent information for the subsurface image, it has been implemented a lot of tools for attribute analyses. It is verified than the amplitude is not the unique attribute, exist a number undefined utile to analyses of geological data from the seismic and well log data.

Additionally seismic interpretation shows an increasing in the attributes analysis, where surveys involved different software, processing

sequences, configurations and platforms, showing increasing of the resources and tools for interpretation analyses.

Aknowledgment

Article was elaborated for doctorate Program research in Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS- Porto Alegre, Brazil), sponsored by National University of Colombia. Thankgiven to Schlumberger and dGB Group for the software contribution, especially to technical support for Petrel's drive (Module and tools 2008) whos make possible the loading, processing, visualization and seismic interpretation with the geophysical integration data.

References

- Al-Husseini, M., Glover J. and Barley B., 1981. *Dispersion Patterns of the Ground Roll in Eastern Saudi Arabia*, Geophysics, Vol 46, p. 121-137.
- Alves, E. C. 1977. Estrutura rasa do talude e sopé da Margem Continental do Rio Grande do Sul e Uruguai. Tese de Mestrado. Ist. Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 77p.
- Al-Yahya, K.M., 1991. Application of the Partial Karhunen-Loève Transform to Suppress Random Noise in Seismic Sections: Geophys. Prosp., 39, p. 77-93.
- Butler., L. W. 1970. Shallow structure of the continental margin southern Brazil and Uruguai. Geological Society of America Bulletin, New York, N.Y., V.81, p. 1079-1096
- Catuenanu,O. 2006. Principles of sequence stratigraphy. Elsevier's sciences & Technology. British Library.
- Chopra, S. and Marfurt, K. J. 2005. Seismic attributes – A historical perspective. Society

- Exploration Geophysicists 75th Anniversary. Geophysics, Vol. 70, No. 5. 26 p.
- D'Agosto, C., Marfurt, K. and Steven, J., 2002. Modeling and Removal of Ground Roll from Horizontal Component of C-Waves. SEG.
- Fomel, S. 2007. Local seismic Attributes. Geophysics. vol.72. No. 3. Pag. A29-A33.
- Fontana, R. L. 1989. Evidências Geofísica da presença de Hidratos de Gás na Bacia de Pelotas – Brasil. 1o Cong. Soc. Bras. Geofísica, Vol.1.
- Fontana, R. L. 1996. Geotectnia e sismoestratigrafia da Bacia de Pelotas Plataforma de Florianópolis. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto algre/RS. 214p.
- Friedman, M. G. 1998. sedimentology and stratigraphy in the 1950's to mid-1980s: The story of a personal perspective. Episodes. Vol. 21. no. 3. New York. USA.
- Gonçalves, A.; Oliveira, M.A. e Oliveira, M. S. 1979. Geologia da Baía de Pelotas e da Plataforma de Florianópolis. Boletim Técnico da Petrobrás, RJ. 79:157-174.
- Haq, B. U., Hardenbol, J., and Vail, P. R. 1987. Chronology of fluctuations sea Levels since the Triassic(250 years ago to Present): Science, V. 235, p.1156-1167.
- Jones, I. F., and Levy, S., 1987. Signal – to – Noise Enhancement in Multichannel Seismic Data Processing: Geophys. Prosp., 35, p. 12-32.
- Karsh, H. and Bayrak, Y., 2004. *Using the Wiener – Levinson Algorithm to Suppress Ground Roll*. Journal of Applied Geophysics 55, p 187-197.
- Levy, A. and Linderbaurn, M., 2000. *Sequential Karhunen-Loève Basis Extraction and its Application to Images*, IEEE Transactions on Image Processing, Vol 9, No 8, p. 1371-1374.
- Liner, C. 2008. Timeline data. American Association of Petroleum Geologist – EXPLORER.
- Luo, Y., Marhoon, M., Al Dossary, S., and Alfaraj, M., 2002. Edge-preserving smoothing and applications: The leading edge, 22, 136, 138, 141-158.
- Marfurt, K.J., Kirlin, R.L.,Farmer, S., L. And Bahorich, M.S. 1998. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherence algorithm: Geophysics, 63,1150-1165.
- Martins, I. L. 1983. Modelo Sedimentar do Cone de Rio Grande. tese de Doutorado. Instituto de Geociências, universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 205p.
- Martins, L. R.; Martins, I.R. & Urien, C.M. 1990. Episódios Dinâmicos de Curta Duração na Margem Continental do Rio Grande do Sul: Registro e Importância. Acta Geológica Leopoldensia. 29 (2): 9-22. Sao Leopoldo. Brasil.
- Mitchum, M. R. Jr., Sangree, J., Vail, P., and Wornardt W. 1994. Reconizing Sequences and System Tracts from Well logs, Seismic Data, and Biostratigraphy: Examples from the late Cenozoic of the Gulf of Mexico. *In*: Weimer, P. &
- Posamentier, H. W. (eds). *Siliciclastic sequence stratigraphy: recent developments and applications*. American Association of Petroleum Geologist, Memoir, **58**. p. 163-197.
- Nesvijski, E. G., 2000. *On a Possibility of Rayleigh Transformed Sub-Surface Waves Propagation*. Center of Technology, Federal University of Santa Maria, Brasil.
- Porto, R. A., 2007. Interpretação Sismoestratigrafica da Porção da Bacia de

Pelotas que engloba o Cone de Rio Grande e a Avaliação do seu Potencial Petrolífero. Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Macaé/RJ.

Sacchi, M.D., 2002. *Karhunen - Loève (KL) Filtering of Seismic Data Algorithm*. Signal Analysis and Imaging Group (SAIG), Department of Physics, Alberta University.

Scales, J. and Snider, R., 1998. *¿What is Noise?:* Geophysics, Vol 63, p. 1122-1124.

Trygve Randen, Stein Inge Pedersen and Lars Sonnelan. 2003. Automatic Detection and Extraction of Faults from Three Dimensional Seismic Data. AAPG Annual Convention Salt Lake City, Utah.

Urien, C.M.; Martins, L. R. e Martins, I.R. 2003. Paleoplataformas e Programação Deltaica do Neogeno na Margem Continental do Uruguai e Norte a Argentina. Gravel No. 1. 40-46. Porto Alegre - Brasil.

Yilmaz, O., 1987. *Seismic Data Processing:* Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, p. 9-79.

Zywicki, D., 1999. *Traditional Seismic Surface Wave Tests*. Georgia Tech Research Institute (GTRI), p. 11.34

2.3 ARTIGO III. Rio Grande Cone Stratigraphy Sequences, Structural Geology and Seismic Geomorphology

Rio Grande Cone Stratigraphy Sequences, Structural Geology and Seismic Geomorphology.

L.A. Castillo^{1 2 *}, F. Chemale Jr.² and T. de S. Kazmierczak³

¹ *Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Curso de Geofísica, Bogotá, Colombia.*

² *Instituto de Geociências, Curso de pós-graduação em estratigrafia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, Brasil.*

³ *Schlumberger Ltd, Brazil.*

* Correspondence author.

Email address: lacastillo@unal.edu.co
lacastillo@yahoo.com.br

Phone # 51-71-33471056

Abstract

Geomorphologic seismic research are based in 3D information and good quality data, they are expensive and keep them in secret form or priority reserve, otherwise 2D seismic information poor quality or low fold. Although Rio Grande Cone is characterized like a large-scale geomorphologic feature this had been not mapping in subsurface, a lot of visualization correspond to schematic representation and time transversal interpretation without spatial or sequential depth modeling. In this paper were modeling the feature, from 2D seismic lines and 1 well log extracting all geophysics, geological and stratigraphy characteristic to generate a geological and geomorphological modeling. This could be justified using an approach, i.e. one q3D (virtual 3D) using interpolation velocity in another domain or adding a coordinate (2,5 Dimensional). The velocity model, seismic interpretation, stratigraphy, geophysical analyses and computational tools could be integrated to sequence stratigraphy and seismic interpretation data from the Rio Grande Cone, permitted to establish some geomorphic features a long its extension. The Rio Grande Cone is placed on Pelotas basin, it is a passive Margin with vast extension, few sampling and depth sediments. Within 2D seismic survey in Rio Grande Cone could be identified different sequences, with their geological and structural elements. The integration of sequence stratigraphy with seismic attribute tools permitted the geomorphological interpretation of geomorphic elements i.e., channels, canyons, levee, contourites, fluid escape, pockmarks etc.

The integration of some seismic lines, well logs data, conversion domain, sequences stratigraphy and geological interpretation given the necessary information to build the three dimensional model.

Into the Rio Grande Cone model was obtained some geological and geomorphological characteristics, useful to knowledgement of subsurface that can not be obtained with another exploration methods.

Keywords: Rio Grande Cone, Seismic Geomorphology, Sequence stratigraphy, 3D modeling.

1. Introduction

Seismic data increased the quantity and quality of information, reveling geological and geophysical elements by means of spatial and temporal relationship. Although, geomorphological model requires volumetric data, good resolution and sophisticated software, could be possible to obtain a three dimensional approach, from two dimensional seismic data. In our case, the data are public information and refers to seismic section 2-D lines which they have been used for reproduce a three dimensional subsurface model. The knowledge of geophysical process and the integration with research tools of another earth sciences disciplines have been used for interpretation and modeling.

In this paper, by means of the subsurface seismic reflection coverage could be provide an approach to the geological model in spatial and temporal domain for a geoform located on Pelotas Basin, so-called Rio Grande Cone (RGC). RGC makes up part of Pelotas Basin offshore with irregular appearance. Its extension is elongated seaward that is composed by fine-grained sediments (mudstones and shale) as the dominant facies. The RCC comprises to the northwest the

shelf, and to the southeast the slope, including the break shelf. An echelon, N-NE fault system controlled depocenters that developed across the Southern offshore Brazilian region. The sequences are thin in the near offset, with pinch out, after that, in the far offset (seaward) the sequence are thicker than near offset. In the thicker package, the faults are well defined cutting all RG cone sequence.

The results lead anomalies into seismic data that are reflected on evidence as velocity abrupt changes, multiples, bottom simulator reflector, fluid escape, lithostatic load, compressional stress, isostasy and complex tectonic structures. The high amplitude reflector, parallel to the seafloor (Bottom simulator reflector, BSR), is observed extending into deeper water and crossing the sequences. This BSR are indicator of the presence of gas hydrate, that on the Rio Grande Cone correspond to one of the largest potential energy resource in the Brazilian offshore.

Geomorphological study permits the integration of disciplines like seismostratigraphy, stratigraphy sequences, and structural to obtain an approximation of the presence of geological elements into deep water zones, i.e. Shale intrusions, contourites, listric fault, Bottom surface reflectors, that comprise important elements for the hydrocarbons traps.

2. Geological setting

The Brazilian Southern is characterized by presence of Rio Grande Rise which divides the Pelotas and Santos basins. The mid shelf fault zone mark the oceanic to continental crust transition, resulting in the formation of two of the major offshore sedimentary basin, Santos Basin to the north and the Pelotas Basin the south, these basins are passive Atlantic-type margin divided by the Rio Grande Rise (Fig. 1A). The initial rifting between the South America and initial Africa (~ 130-135 m.y.) with uplifting of Precambrian rocks and lava deposition an

extensive volcano-sedimentary sequence was deposited. The transitional phase from rift to post-rift is marked by the salts deposits well preserved in the Santos Basin to the North (Milliman, 1978), developed during Aptian, associated with arid climatic extreme conditions. The Rio Grande-Walvis Ridge was a topographic barrier which gave rise to a salt gulf in the eastern Brazilian margin, while to the south (Pelotas Basin and southern basins of eastern South America) the sedimentation is represented by clastic sediments and some biogenic sediment without salt layers. From the Albian to Recent continue the drift oceanic stage, generalized in function of thermal subsidence mechanism, and their principal features have been geoforms and marine facies, obtained like influence of relative sea level, associated to subsidence tax, tectonic and eustatic episodes (Chang & kowsmann, 1987). During sea level rise, subsidence and tectonic increased the composed subsidence. In the Pelotas Basin, during the Miocene, the Rio Grande Cone formed due a huge clastic sediment supply, characterized by package thickness up to 5000 m, when the thermodynamic subsidence rate was not significative to explain such amount of sediments (Fontana, 1996).

INSERT FIGURE 1

Rio Grande Cone could be characterized sismostratigraphically as a sedimentary geoform from Miocene building in the offshore in front of the Lagoa dos Patos and Lagoa Mirim. It could splitted using the analogous Walker's submarine Fan classification (Walker, 1978), for example, according the sedimentary supplied, seismic association and located geofoms in everyone morphometrics division (upper, intermediate and lower cone). Those areas have been building by supply of hemiplegic and pelagic sediments from the of the Souhtenr Brazil, Argentina and Uruguay continental areas (crystalline basement and phanerozoic rock, Fig. 1B)

from the Miocene until today. Upper Cone comprises extends levees fill by sandstones and siltite material. Intermediate Cone is comprised by interdigitalization of levees few developed with stratification of sandstones and turbidities, associated to slope; Lower Cone is a feature with smooth topography, plane supplied by hemipelagic muds and turbidites. Bottom surfaces or contourites have been reported along paleo-current flows and depositional gravitational process, like responds of the negative paleotopography (Rio Grande Cone Bathymetric Chart, LEPLAC, 2004).

3. Geophysical Information

Seismostratigraphic analyses and modeling were based in seismic sections including lines of LEPLAC-IV and Petroleum National Agency, using the SAD69 as reference datum. The seismic grid is composed of NW-SE dip and NE-SW strike lines with regional fold of 2400% and records from five to ten seconds and hundreds of kilometers. Some of seismic lines are regional and other local ones. The survey is located on the Pelotas Basin Offshore, in a geomorphological feature named Rio Grande Cone (RGC) (Fig. 1A). It comprises a geobody that extends from shelf to abyssal plain with an estimated area of 28900 km². In this study, seismic data were resampling for 4 milliseconds and cropped to three or four seconds in order to analyze the CRG region itself. This process was required for optimization and increase of the data processing and memories capacity during visualization and analyses. For modeling we used the seismic information is of 30-45 Hz and average velocity of 1900-3500 m/sec and also well log velocity calculated at 90 μ s/ft. This consideration would be made because the sampling data have been spread over a wide area with very few information.

3.1. Data Selection

Seismic data represented by two dimensional dip and strike sections, allowing different kind of analyses like structural, geophysics, stratigraphy, geomorphology and modeling. This paper is based in structural and stratigraphy analyses of the Rio Grande Cone, where are identified structural features in spatial domain, it comprises tectonic and sedimentary structures in different scales. Rio Grande Cone could be considered a geobody having a slightly rectangular having parts places at semicircular segments shape. It is affected by a fault complex system that passing or crossing some of the stratigraphic horizons and sequences.

4. Methodology

Synthetic stratigraphic analyses (Posamentier, 2003) for sismostratigraphic interpretation, assumes analogous models and interaction with visualization process, interpretation and modeling tools (Petrel, 2008) to correlate regional and local concordance events in the study area.

Geophysical data sets, including regional seismic section and well logs, were used to modeling the Rio Grande Cone, comprising structural and stratigraphy sequence framework for Tertiary to recent deposits. The sequence stratigraphic methods applied on several passive margins make simpler the structural complexity than other settings, it supposes that sea level had been the dominant control mechanism. This condition does not explain all structural elements of the Rio Grande Cone. It presents structural elements of growth fault, substrate movement, extensional faulting and thrusts. The cone stratigraphy sequences had been influenced by structural complexity, high sedimentation and sea level change. Structural, stratigraphy and

geomorphological elements integrated with geophysics parameters permitted building a depth modeling as those which influenced the Rio Grande Cone area.

Data should be analyzed in different forms and processing sequences during the interpretation and models with several visualization and modules tools. Firstly, could be entered and verified the seismic data: Dump, edit and tie with geological or geophysical information. Data include structural, stratigraphy and geomorphology information input. During key surfaces recognizing (Maximum flooding, Maximum regressive and correlative conformity), correlation procedures of horizon associated with geological age (Middle-lower Miocene to Recent), into the shallow surface until deeper zones, surface generation and structural and stratigraphy modeling (Fluxogram, Fig.2).

INSERT FIGURE 2

5. Sequence Stratigraphy

The area comprised several sequences that had been determined from seismic terminations and geometry, associated with chronostratigraphy and biostratigraphy information obtained from earlier authors (Fig. 3). The different sequences of Rio Grande Cone had been identified through horizons delineated from seismic reflections included Pelotas Basin analysis and Cone areas for hydrocarbons exploration (Alves, 1977; Fontana, 1996; Abreu, 1998), where had been described at least 12 sequences. The geophysical integration of seismic, well log, gravimetric and seismostratigraphic interpretation permitted evidence tectonic uplift from Eocene associated to vulcanism caused by Pacific, Antarctic and African Plate and Andean tectonism increased progradant deltaic system, i.e., Rio Grande Cone considered a depositional feature with more than 5000 m of thickness from Miocene to Recent. The Megasequence are 50

Ma and they could be divided in sequences of second and third order (Fontana, 1996). The RGC feature formed in the drift phase. Another authors using geophysical information (interpretation with some seismic lines) described sequences related to Rio Grande Cone (Simões, 2004; Porto, 2007), where sedimentation was the dominant process and related subsidence over tectonic and eustasy parameters. We assume that the sequences originated from Miocene until recent, comprise a sedimentary package with different depocenters that were affected by tectonic influence, sediment supply and eustasy (Fig. 4).

INSERT FIGURE 3

INSERT FIGURE 4

In this paper we defined the genetic stratigraphic sequences based on the maximum flooding surfaces into whole stratigraphic section using the definition of Galloway (1989), that permits delineate sequence boundaries in a large scale. The sedimentary package of the Rio Grande Cone could be classified as Transgressive-Regressive sequence (T-R sequence), where this kind of sequence is bounded by recognizable stratigraphic sequences (Embry, 2002), and patterns stacking geometry based in interpretation permitted delineate different key surfaces. To define stratigraphy sequence from Rio Grande Cone Model was used the last conceptual definitions available in the literature (Catuneanu, 2006), where is presented a standardizing of sequences stratigraphy, i.e, some classical interpretation (Fontana, 1996; Abreu, 1998 and Porto, 2007), and the propose of Catuneanu, 2006. This interpretation includes definition of genetic sequence and nomenclature of system tracts and timing sequence boundaries for stratigraphy models (Cataneanu et al. , 2008) where the system tracts provide the basic division of the

Miocene sequences of the Rio Grande Cone into genetic packages that show trends according to the strata stacking and sea level changes. The strong reflections and geometries allow identify the key surface, i.e., surface unconformity, maximum regressive surface, maximum flooding surface and correlative conformity (Fig. 5A).

INSERT FIGURE 5

Sequence stratigraphy associates each type of shoreline shift (Forced regression, Normal Regression, Transgression) with genetic type of deposits, then it includes genetic unit linkage accommodation, and supply sedimentation. The Miocene sequence package on seismic section on the Northern of the Rio Grande Cone may be divided into system tracts, which consist of three strata genetically distinct: Lowstand Normal Regression, Transgression and Highstand normal regression. The lower package is the lowstand normal regression; corresponding to early stage of base-level rise with progradational and aggradational trends (Fig. 3 and Fig. 5A-B), where their lower boundaries is the subaerial unconformity that extends to the seaward correlative conformity. The upper surface comprises the maximum regressive surface defining clinofolds of regression, overlapped by transgressive strata. By the retrogradational stacking pattern is possible to identify the transgressive deposits, limited on the top by maximum flooding surface. Maximum flooding surface could be delineated from strata stacking pattern, marking the change from lower transgressive to upper regressive strata (Galloway, 1989), similar to final transgressive surface, (Nummedal *et al.*, 1993). The upper subdivision is the sequence that displays progradational strata packing and occurred during the late stage of base-level rise (highstand normal regression), (Fig. 5A-B).

6. Structural analyses

The Pelotas basin is a passive margin basin characterized by extensional tectonics associated with rift phase and also during the drift phase. The Rio Grande Cone which, is large structure in the Pelotas Basin, developed also in the regional extensional tectonics, but it is somewhat more complex from the structural point of view. So the sequence like retrograding and Rio Grande Cone wedge is characterized by a structural style that is different when it is compared to other places into the Pelotas basin. It could be represented in plan-view by polygonal complex fault system extends some kilometers long, with one principal fault located on the center of the cone sequence (fig. 6).

INSERT FIGURE 6

This large structure has some special features as high sedimentation rate during the Miocene to Holocene (a long period of ca. 20 Ma) with amount of ca. 200 m/Ma. So in the restricted area of ca. 28900 km² has deposited more than 4km thick sediments. In spite of the structural style it could not be identified by section seismic interpretation directly, for that a model approach applied it, the modeling permitted a three dimensional representation of the principal structural elements that characterized the Cone. The main tectonic features of the CRG are listric extensional faults and related structures, thrust and folding.

The geometric shape of the CRG is a half circle in map view and arcuated, with the main fault system located at the boundary between platform and talude. This fault system is represented by the master listric fault which is connected to the detachment at the lower base of the CRG, probable at the contact between the Oligocele sediments and Miocene sediments (Fig. 7).

INSERT FIGURE 7

The tectonic features recognized in the CRG (internal structures of the CRG) are:

- 1 Normal faults (synthetic and antithetic ones)
- 2 Structural highs
- 3 Thrusts and related folding
- 4 Transcurrent faults as Riedel and anti-Riedel ones
- 5 Bottom simulator reflectors (BSR).

It is noteworthy that the geometry of the Cone is well defined by the Master and connected detachment. This fault system is oriented at SW-NE and dipping to the SE, recognized as the boundary of CRG structure. The internal normal faults (synthetic and antithetic ones), the secondary faults, are mostly listric also, and in most cases are either connected to the detachment or cut that structure. Among their planes were described with decollement plane that is oriented on horizontal plane and high detachment, including antithetic faults, they are extended through the sedimentary package with some strike planes cutting faults founded on the external Rio Grande Cone area. These faults cut all sequences accompanying folds and fault propagation, characteristic on the far offset (Southeast) of the dip seismic lines. We recognized some folding due to strain accommodation in the RGC related to the rotational deformation (e.g. Accommodation and roll-over structures).

The tectonic inversion is mostly concentrated in the end of the CRG structure (SE portion of the CRG) and is represented by folding (asymmetric folding) and thrusts that are minor

structures when compared to the listric normal faults. The thrusting are then vergent to the SE as result to the constriction of the final of the CRG structure related to extensional displacement of the whole CRG. The normal faults are developed mainly up to Upper Miocene and Pliocene, indicating that the major sedimentation rate and therefore deformation occurred from the middle Miocene to Pliocene.

On other hand, the thrusting faults seem to extend up to the Bottom Surface Reflectors, a structure identified at the top of the CRG with hydrate gas associated, suggesting the accommodation stacking of sediments in the SE extreme of the CRG occurred longer, up to Quaternary.

Among of the relevant fault planes—the principal fault is connected to the lower decollement at the base of RGC and the lateral ramps to south and north. Also, had been included antithetic faults, extended through the sedimentary package with some strike planes cutting faults founded on the external Rio Grande Cone area. These faults cut all sequences with simultaneous development of folds and fault propagation, characteristic on the far offset (Southeast) of the dip seismic lines.

Progradation zones are the most affected and influenced by normal fault systems with vertical or high inclination degree, that converge toward master fault (145 km width). The main master fault can be described as structure of ca. 22 km as the listric plane (the western limit of the CRG) and 25 km length of detachment plane (the subhorizontal part of the Master Fault). On other side, the master fault is ca. 145 km width, as we can observe on Fig 7. The large supply of sediments is thus directly related to the displacement of master fault and secondary structures, as result of the sediment overload and flexure of the lithosphere.

7. Structural Modelling

Based on structural features and stratigraphy characteristics was possible to build-up a structural framework recognized in the seismic sections of the CRG. Structural modeling herein presented, includes the different stage (Fig. 8a-h) with emphasis in extensional and transcurrent faults. Firstly, were indicated the precise position of the fault, by means of sticks (Fig. 8a); the next step, comprises the edition (Fig. 8b), following by the fault surface generation (Fig. 8c). For the fault surface was applied a linear interpolation grid (Fig. 8d), with two main orientation I and J (Fig. 8f). The grid was delimited by the cone body denominated boundary (Fig. 8e). The master fault comprises the western limit of the RGC and the basement of the model was the Oligocene to Paleocene sediments, where the cone was deposited. On the two last stages, there were included stratigraphic elements, i.e. horizons and sequences that divide the grid in K orientation (Fig. 8g), and the last one, was population of the cells model.

The virtual 3D of whole or part of the model was made through the intersections that cross the model in any direction (Fig. 8h). The master fault and the single faults comprise echelon segments that compartmentalized the basin and demonstrated their interaction with stratigraphy and geomorphology elements. Tectonostratigraphic domains could be established from interpretation and final modeling, which permit a tridimensional visualization of the different elements namely lineaments, faults and other structural elements (Fig. 8h). All structures presented in sedimentary sequences of Rio Grande Cone include: bedding and their boundaries, structural anisotropies like faults planes, propagation faults, fractures and folds all of them with different domains that characterized the failure mode like bedding planes, pinch out sequence, unconformities, faults, fault limit plane (i.e. Stewart and Reeds, 2003).

INSERT FIGURE 8

The most important structural element had been influenced by gravity tectonics along thin skinned detachment surface, style that dip south-southeast and extends along the cone. This tectonism is related to load subsidence due to a deposition a very thick sequence in the Miocene. For determining structural and reactivation timing, reflections and structures inside Miocene horizons or surfaces (Horizon 1 to 3) could be considered; drawing isopachs for each succession. This could be established the fault movement (or displacement) along the RGC formation or time. In our model, the faults propagated to southeastern, being more recent to the north portion of the RGC and upward of the sequence. The diagram (Fig. 7) shows that few faults were active before Miocene, behavior that changes after reactivation of some faults, scattering for the southeast Pelotas basin.

8. Tectono sedimentary evolution of the Rio Grande Cone.

The Pelotas Basin has the Rio Grande Cone geoform where tectonic elements had been associated with sedimentary package that it deposited from Lower Miocene to Recent. Seismic sections of the Rio Grande Cone show geometrical terminations like topset, bottom set and foreset (Figs. 9A and B) that could be divided into several zones. In the basal sequence can be recognized by slumps, turbidites or gravitational flows. The intermediate portion (foreset) is characterized by low-stand to transgressive sediments, debris flow and slices. The upper zone presents aggradational sediments with fine material originated from marine deposition.

The fault geometry of kilometer-scale results from interaction of tectonic style, mass movement or remove and submarine setting. One of the principal structural elements is characterized by a listric fault associated to fragile zone, it break blocks with among of fractures, vertical and semi-parallel, that lead main structural dip to SE (Fig. 7 and Fig. 8). Thus, these faults are posterior to the deposition with vergence toward southeast and are as young as Pliocene

in age. The Rio Grande Cone morphology is influenced by offshore fault plane that corresponds to normal steeply toward shelf where is converging another plane with Eastern-Southeastern vergence; this plane changes to flattening seaward. In this principal fault converges another ones planar failure surfaces that propagates across it to the southeast. The detachment is an extensional plane of 20 km and width of 70 km approach. The area is characterized by post tectonic seismic features like mass wasting, including slumps, debris flows and turbidities that comprises submarine mass flow system (Shanmugam *et al.*, 1996). The fault style could be associated to fault propagation thought sequence package and the extensional structural model had been used for seismic interpretation that in some case it is a guide on the seismic sections (Stewart and Reeds, 2003). Normal faults had been related to sequences architecture of synrift deposits, this link is illustrated by geomorphological analyses, including neotectonic, Quantitative geomorphology , all they understood from subsurface data comprising three dimensional seismic data and well information that permit quantify the supply sediments over extent areas (McLeod *et al.* 2002).

INSERT FIGURE 9

To the south of Brazilian offshore, in the far offset of the seismic line, is possible identify folds faults propagation and reverse faults, they could be described in this work as fault system not well developed as those from the extensional system. This characteristic of faults with smaller size does not allow modeling with the used software.

The sedimentary supply through the RGC was derived from sediments bulk from the cratonic areas and cover (as Paraná Basin sediments and Serra Geral Volcanic rocks), including sediments procedents of Camaquã and Jacuí river and de la Plata River (Martins *et al.*, 2005). The

continuous deposition increase the lithostatic load, starting the slip on master fault, together the stacking sediments. The deposition continues during this stage and during the synsedimentary faulting produces slicing of the sequences. Those packages were settled into the master fault, with thick progradant sequences giving places to low stand system regressive deposits (Fig. 10A), with few structural influence, except by the presence of the master fault. This basal sequence is followed by the retrogradational sequences deposition, which represents the transgressive system (Fig. 10B). This sequence is crossed by faults located at the northeast of the cone area. Sediments accumulation during Tertiary shows their maximum sediment supply at Middle Miocene. After that, the Pliocene to recent accumulation had registered a sedimentary charge lower than earlier periods. The last accumulation corresponds to the highstand regressive system.

INSERT FIGURE 10

9. Seismic Geomorphology

Seismic geomorphology had been a new discipline development for three dimensional seismic data, where sections and slices revealed out past land and seascapes in subsurface (Posamentier, 2004). In those case images and seismic attributes analyses comprise tools that permitted direct interpretation of depositional environment (Rafaelsen, 2006). For geomorphology evaluation was necessary to gather evidence of the system faults that could be observed by lineaments checking, drainage patterns, channels profiles and gradients calculations (Groeger and Bruhn, 2001). Those characteristics could be obtained from surface mapping or satellite and photo interpretation, an otherwise geophysical data could be used for extract subsurface information, for instance, structural, stratigraphy or geomorphology ones. Geomorphological aspect of Rio Grande Cone includes sequence stratigraphy and

seismostratigraphy analyses, obtained from 2D grid seismic survey. The principal aim is obtain a three dimensional geomorphological model, with description of the features affected by influence on sediment supply. The seismostratigraphic analyses permitted describe parallel and continuous sequence on upper modern deposits. This deposit had been considered as transition and marine environments, influenced by hydrological sediments, channel and canyons geometry with materials loaded on slope. After seismostratigraphic analyses followed the geomorphological analyses, including identification and description of geoforms with geological and geophysical correlation on different subsurface depth or time intervals (Fig. 11).

INSERT FIGURE 11

The geomorphological features observed by seismic interpretation suggest possible drainage patterns, canyon and channel systems (Fig. 12 and 13) with geological structures (contourites). Submarine canyon include Channel complex system presenting a rectangular drainage with south-southern trending and linked with shorter tributaries east-west trending, it caused by bedding and tilting subsurface, south-southeast trending preferential erosion. Based on the geomorphological features at least five subsystem drainages are recognized in the RGC, including canyon and channels distributaries. The Canyons located inside the central region present length that vary from 85 km to 48 km (include channel systems CC3, CC4 and (CC5). The termination canyons lie close to the system faults, those systems were affected by faulting complex controlling the form and trending of canyon and channel drainages. The corner canyon system can reach 56 km (with channel systems CC1 1and CC2). The tributary channels of canyons are between 3 to 11 km long (Fig. 12 and 13). The channels area comprises mostly by fine-grained material (such as mudstones and shales).

INSERT FIGURE 12**INSERT FIGURE 13**

In the Rio Grande Cone, the larger structures developed slices, slumps and mass transport complex controlled by normal fault system in the proximal and intermediate area, while reverse faults and folds are the main structures in RGC distal portion. Ondulation reflection are characteristic form sediment waves originated from currents flowing across sea bed. They are identified on seismic package that contains at least two wave-shape units (Schwab *et al*, 2007). This architectural element characterizes the Rio Grande Cone slope and sediment wave and bottom-currents deposits are described in different areas and founded in channels or mouth canyons. The morphology corresponds to expression of bottom-current activity on the near offset and slope at the Northwestern. Miocene sequence slope is characterized by seismic facies represented by turbidities which is some places reworked by contourites currents.

Rio Grande Cone geform is a pitch out extends along NW-SE shelf to offshore, with predominant clinofolds, corresponds to a regressive clastic succession. Its thickness is between 1 to 2.5 km, that comprise the Rio Grande shelf, slope and the oceanic floor. The slope is constituted by different sediments. Rio Grande Cone is presented in a fall southern with flux seaward, giving place to canyon or channel that could be extended several kilometers from the shelf along the border of the Pelotas Basin near the oceanic floor.

The last decades offshore hydrocarbons studies around the world have reported escape flow structures – named pockmarks- in shallow waters (30-100m) to depth zones (~3000m).

Based in seismic and stratigraphy studies associated to Glaciomarine tillites and suggest structural control by fluid flows.

Structural surfaces along of rock layer, diapir, anticline and polygonal fault, created pathways for depth fluids migration. Those pockmark are associated to buried reservoir of biogenic gas, gas or termogenic oil, interstitial water or the mixed (Gay and Bernd, 2005; Andresen *et al.*, 2006). Fluid escape occurs from the final portion of the shelf to the slope of the RGC related to slide, slumps and submarine turbidites (Rosa *et al.*, 2006). Fluid escapes are indicated by the chimney presence in seismic section and vertical faults, also could be visualized by the anomaly characteristics (multiples, Bottom Simulator Reflector), being evident pockmarks and pipes tubes, associated to polygonal faults, slides and slumps.

All the elements and final shape of the Rio Grande Cone is showed in the computational model that corresponds to the geoform, interpreted from the seismostratigraphy including geophysical, structural and geomorphological elements. The estimated volume of sediment supply in the RGC is ca. $5.024943 \times 10^{12} \text{ m}^3$ based on the 3D final model (Fig. 14).

INSERT FIGURE 14

10. Conclusion

2D seismic information permit to establish a regional approach of geobodies associated in depth or temporal domain. Sedimentation of the Rio Grande Cone is affected by set of extensional faults that across sedimentary sequences from Miocene to Recent. However, the recent sediments are not so often cut by these extensional faults, but fluids escaping zones are recognized by seismic anomalies i.e. diffractions or pull up velocity in these upper section of the RGC.

Three dimensional modeling and visualization permitted reveals the presence of structural, stratigraphic and geomorphologic elements that could be integrated for analyses and evolution of the RGC. Then canyon and channel system are the most important geoforms that occur in the prominent body of the RGC.

Structures and deformations in the RGC are associated with subsidence and mass movement or fluid flow. The prominent faults correspond to dislocated blocks showed with polygonal forms in view plan, while in seismic section are describe like vertical segments and planes that correspond to posterior structures to the sedimentary deposition. The master fault of the RGC extends 25 km along the listric portion and 22 km along the detachment. Many secondary subvertical extensional faults connected to the main extensional fault can be visualized, too.

These analyses include geomorphological elements integrating structural and stratigraphic interpretation, demonstrating the influence of tectonostratigraphy on package sequence geoform that it has been affected by tectonic, sedimentary supply and isostasy. The tectonic subsidence played a very important role during the RGC formation, mainly related to sediment overload (due to very high sedimentation rate) and consequently extensional faulting in the proximal and intermediate and also reverse faulting in the distal portion of the RGC.

By generating three dimensional models offers a better understanding of structural trends, kind of faults, features, geoforms and relationship between subsurfaces, which they provide the necessary information for estimated sediment supply volume as well as for the to outline the hydrate gas reservoir in the RGC.

Acknowledgments

This study is part of the Ph. D. research of Luis Antonio Castillo Lopez at the Rio Grande do Sul Federal University (UFRGS Brazil). It has been sponsored by National University of Colombia (Bogotá – Colombia). Also, we thanks to schlumberger (Brazil), for helping with the Petrel 2008 software and the interpretation, modeling and visualization modules of seismic and well logs data.

References

- Abreu, V. S., 1998. Geologic Evolution of Conjugate Volcanic Passive Margins: Pelotas Basin (Brazil) and Offshore Namibia (Africa): Implications for Global Sea-Level Changes. Doctorate These – Rice University, Houston, Texas, USA. 354p.
- Alves, E. C., 1977. Estrutura rasa do talude e sopé da Margem Continental do Rio Grande do Sul e Uruguai. Tese de Mestrado. Ist. Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 77p.
- Andresen, K., Clausen, O.R., Huse, M., 2006. A 3D seismic analysis of the geometries and distribution of upper Miocene pockmarcks in the central North Sea. European Geosciences Union. Geophysical Research. Abstract, 8, 01891.
- Anjos-Zerfass, G. S., Souza, P. A., Chemale Jr. F., 2008. Biocronoestratigrafia da Bacia de Pelotas: estado atual e aplicação na geologia do petróleo. Revista Brasileira de Geociências 38(2), 42 – 62.
- Ayup-Zouain, R. N., Ferreira, H.L., Barbosa, E. G.; Tomazelli, L. J. 2003. Evidência morfológica de um paleocanal holocênico da laguna Mirim nas adjacências do Banhado Taim. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 9, Anais... 1CD-ROM.

- Butler., L., W. 1970. Shallow structures of the continental margin southern Brazil and Uruguai. Geological Society of America Bulletin, New York, 81, 1079-1096
- Catuenanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J. P., Blum, M. D., Dalrymple, R. W., Erikson, P. G., Fielding, C. R., Fisher, W. L., Galloway, W. E., Gibling, M. R., Giles, K. A., Holbrook, J. M., Jordan, R., Kendall, C. G. St. C., Macurda, B., Martinsen, O.J., Miall, A. D., Neal, J. E., Nummedal D., Pomar L., Posamentier, H. W., Pratt B. R., Sarg J. F., Shanley, K. W., Steel R. J., Tucker M. E., Winker C., 2008. Towards the standarization of sequence stratigraphy, earth science Reviews, doi: 10.1016/j.earscirev.2008.10.003. Elsevier's sciences & Technology. British Library.
- Catuenanu, O., 2006. Principles of sequence stratigraphy. Elsevier's sciences & Technology. British Library. p. 375.
- Chang, H. K., kowsmann, R.O., 1987. Interpretação Genética das Sequências Estratigráficas das Bacias da Margem Continetal Brasileira. Revista Brasileira de geociências, **17**, 74-80.De
- Dias J. L., Silveira, D. P., Sad A. R. E., Latgé M. A. L., 1994. Estágio atual do conhecimento geológico. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **8**(1), 235-245.
- Embry, A., 2002. Transgressive-Regressive Sequence Stratigraphy (T-R), 22nd Annual Gulf Coast Section SEPM Foundation Bob F. Perkins Research Conference. 22p.
- Fontana, R. L., 1989. Evidências Geofísicas da presença de Hidratos de Gás na Bacia de Pelotas – Brasil. 1o Cong. Soc. Bras. Geofísica, Vol. 1.
- Fontana, R. L., 1996. Geotêctnia e sismoestratigrafia da Bacia de Pelotas Plataforma de Florianópolis. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS. 214p.

- Galloway, W., 1989. Genetic Stratigraphic sequences in basin analysis I: architecture and genesis of flooding surface bounded depositional units. *American Association Petroleum Geologist Bulletin* 73, 125-142.
- Gay, A., Berndt, C., Contrucci, I., 2005. Fluid migration and pokmarcks related to poligonal faults, hydrate layers and landslides near the Storegga slide, norwegian margin. *European Geosciences Union. Geophysical Research Abstracts* 7, 05323.
- Gomes, P. O., Severino, M. C. G., Gomes, B. S., 1993. Projeto LEPLAC: Interpretação Integrada dos dados Geofísicos do Prospecto LEPLAC-IV Margem Continental Brasileira, in: *Anais do 3o Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica. Rio de Janeiro (Brasil)* 2., 1275-1280.
- Gomide, J., 1989. Bacia de Pelotas – Bioestratigrafia baseada em nanofóseis calcáreos. In: *SBP, Congresso Brasileiro de Paleontologia, Anais* 11, 338-351.
- Gonçalves, A., Oliveira, M.A., Oliveira, M. S., 1979. Geologia da Bacia de Pelotas e da Plataforma de Florianópolis. *Boletim Técnico da Petrobrás, RJ.* 79, 157-174.
- Groeger, A., Bruhn R., 2001. Structure and geomorphology of the Duchesne graben, Uinta basin, Utah, and its enhancement of a hydrocarbon reservoir. *American Association Petroleum Geologist Bulletin* 85(9), 1661-1678.
- Haq, B. U., Hardenbol, J., and Vail, P. R., 1987. Chronology of fluctuations sea Levels since the Triassic(250 years ago to Present): *Science*, V. 235, p.1156-1167.
- Koji, J., Marcondes, J. de S., 1999. Brazilian undersea features: A Gazetteer of geographical names. *Sociedade Brasileira Geofísica - SBGF*.
- Lisboa, C. M., Mezarobba G., 1998. Um mergulho no mar brasileiro. *Feria Mundial de Lisboa expõe riquezas do oceano. Revista Veja* 03/06/98, 1549.

- McLeod, A., Underhill, J., Davies, S., Dawers, N., 2002. The influence of fault array evolution on synrift sedimentation patterns: Controls on deposition in the Strathspey-Brent-Statfjord half graben, northern North Sea. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin* 86(6), 1061-1093.
- Martins, L. R., Urien, C. M., Buttler, L. W. 1972. Províncias fisiográficas e sedimentos modernos da margem continental atlântica. Congresso Brasileiro de Geologia, 26o, Belém-Pará. Anais... Sociedade Brasileira de Geologia, p. 105-114.
- Martins, I. L., 1983. Modelo Sedimentar do Cone de Rio Grande. tese de Doutorado. Instituto de Geociências, universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 205p.
- Martins, L. R., Martins, I. R., Urien, C.M., 1990. Episódios Dinâmicos de Curta Duração na Margem Continental do Rio Grande do Sul: Registro e Importância. *Acta Geológica Leopoldensia* 29 (2), 9-22. Sao Leopoldo. Brasil.
- Martins, L. R., Urien, C.M., Martins, I. R. 2005. Genese dos Sedimentos da Plataforma Continental Atlântica entre o Rio Grande do Sul(Brasil) e Terra del Fuego (Argentina). *Gravel Geológica* 3, 85-102. Porto Alegre. Brasil.
- Milani., E. J., Brandão., J. A. S. L., Zalán. P. V., Gamboa, L. A. P., 2000. *Revista Brasileira de Geofísica* 18 (3).
- Milliman, D. J., 1978. Morphology and Structure of Upper Continental Margin Off Southern Brazil. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin* 6 (6), 1029-1048.
- Mitchum, M. R. Jr., Sangree, J., Vail, P., Wornardt, W., 1994. Recognizing Sequences and System Tracts from Well logs, Seismic Data and Biostratigraphy: Examples from the late Cenozoic of the Gulf of Mexico. *In: Weimer, P. & Posamentier, H. W. (eds). Siliciclastic sequence stratigraphy: recent developments and applications.* American Association of Petroleum Geologist, Memoir, **58**, 163-197.

- Nummedal, D., Riley, G. W., Templet, P. L., 1993. High-resolution sequence architecture: a chronostratigraphic model based on equilibrium profile studies. In: H. W. Posamentier, C. P. Summerhayes, B. U. Haq and G. P. Allen (eds.) sequence stratigraphy and Facies Associations. International Association of Sedimentologists Special Publication 18, 55-68.
- Ponte, F. C., Asmus, H. E., 2004. As bacias marginais brasileiras: estagio atual do conhecimento. *Classicos da geología do petróleo brasileiro. Boletim Geociências, Petrobras, Rio de Janeiro* 12 (2), 385-420, maio/nov. 2004.
- Porto, R. A., 2007. Interpretação Sismoestratigrafica da Porção da Bacia de Pelotas que engloba o Cone de Rio Grande e a Avaliação do seu Potencial Petrolífero. Tese de Doutorado, p. 264. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Macaé/RJ-Brasil.
- Posamentier, H. W., 2004. Seismic geomorphology: imaging elements of depositional systems from shelf to deep basin using 3D seismic data: implications and development. In: Davies, R.J., Cartwright, J.A., Stewart, S.A., Lappin, M., Underhill, J.R., Eds, 3D Seismic technology: Applications to the Exploration of Sedimentary Basins. Geological Society, London, *Memoirs* **29**, 11-24.
- Rafaelsen, B., 2006. Three-dimensional seismic geomorphology: new methods providing new geological models. Dissertation for the degree of Doctor. Department of Geology, p. 178. University of Tromsø, Norway
- Rinaldi., V. A., Abril, G. E., Clariá, J. A., 2006. Aspectos geotécnicos fundamentales de las Formaciones del delta del Río Paraná y del estuario del Río de la Plata. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil* 6(2), 131.
- Rosa. M. L. C., Ayup-Zouain. R., Barboza, E. G., 2006. Utilização de Seções Sísmicas 2D na Identificação de Zonas de Escapes de Fluidos. *Gravel* 4, 109-118. Porto Alegre.

- Shanmugan, G., Bloch R. B., Mitchell, S. M., Beamish, G. W. J., Hodgkinson R. J., Damuth J. E., Straume, T., Syvertsen, S. E., Shields, K. E., 1996. Slump and debris-flow dominated basin floor fans in the North Sea: an evaluation of conceptual sequence-stratigraphical models based on conventional core data, in: Hesselbo, S.P., Parkinson, D. N. eds., Sequence stratigraphy in British geology: Geological Society (London) Special Publications 103, 145- 175
- Schwab, A. M., Tremblay, S., Hurst, A., 2007. Seismic expression of turbidity-current and bottom-current processes on the Northern Mauritanian continental slope. *In*: Davies, R. J., Posamentier, H. W., Wood, L. J. & Cartwright, J.A. (Eds). Seismic Geomorphology: Applications to Hydrocarbon Exploration and Production. Geological Society, Special Publication 277, 237-252.
- Simões, C. T. B., 2004. Evolução Espaço-Temporal dos Principais Depocentros da Sequência Sedimentar Marinha da Bacia de Pelotas. Monografia. Instituto de Geociências, Universidade do Estado de Rio de Janeiro- Brasil. p71.
- Stewart S., Reeds, A., 2003. Geomorphology of kilometer-scale extensional fault scarps: factors that impact seismic interpretation. *American Association Petroleum Geologist Bulletin*, 87(2), 251-272.
- Urien, C. M., Martins, L. R., Martins, I. R., 2003. Paleoplataformas e Programação Deltaica do Neogeno na Margem Continental do Uruguai e Norte a Argentina. *Gravel* 1, 40-46. Porto Alegre - Brasil.
- Walker, R. G., 1978. Deep water sandstone facies and ancient submarine fans: models for exploration for stratigraphic traps. *American Association Petroleum Geologist Bulletin* 62, 932-966.

Zembruski., S. G., 1979. Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. In: CHAVES, H. A. F. Ed. Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. Rio de Janeiro, PETROBRAS. CENPES. DINTEP (Serie Projeto REMAC NUM. 7).

Figure Captions

Figure 1. (A) Map with the study area into the Pelotas Basin. The location of Rio Grande Cone shows the survey grid with seismic line. The image shows geomorphology of the bottom sea and onshore: continent (including *Lagoa dos Patos*) (Adapted from Cardoso and Mezarobba, 1998). (B) Geological map of southern Brazil (after Azup-Zouain *et al.*, 2003)..

Figure 2. Fluxogram with different sequences included and used for seismic interpretation.

Figure 3. Different sequential stratigraphy interpretation for Neogene section in Rio Grande Cone, including biostratigraphy, geology description and eustatic curve. The sketch shows comparison of the sequence stratigraphy on the Rio Grande Cone stratigraphy, i.e. Martins (1972), Alves (1977), Fontana (1996), Porto (2007) and this paper.

Figure 4. Strike seismic section (S6) line with sequential stratigraphy interpretation from Neogene interval in Rio Grande Cone, with depocenter and migration of complex channels, influenced by sediment supply, eustasy and accommodation.

Figure 5. (A) Schematic ideal model representation of the sequence stratigraphic with the regressive and transgressive sequences (highstand, lowstand and transgressive). (B) Sequence stratigraphy interpretation in dip regional seismic section located in the Rio Grande Cone,

Southern of Brazil. The interpretation shows system tracts in large scale (based in Catuneanu et al., 2008).

Figure 6. Plan view map with structural mapping of the principal normal faults and contours of bottom surface. The principal or master fault corresponds to a listric fault (northwesternmost fault) while the other normal system faults are connected in depth to the master fault.

Figure 7. Three dimensional structural model with features identified in the Rio Grande Cone that include regional normal faults and strike slip faults and vertical faults; the model illustrates fault system planes crossing all the sequences of the RGC sedimentary package.

Figure 8. Structural model sketch presenting extensional and transcurrent faults. Fig. 8a, Indicates the exact position of the fault, by means of sticks; Fig. 8b, Edition; Fig. 8c, fault surface generation. Fig. 8d, On the fault surface was applied a linear interpolation grid and Fig. 8d give the direction I and J of orientation. The grid was delimited by the cone body denominated boundary, Fig. 8e. The two last stages include stratigraphic elements, i.e. horizons and sequences that divide the grid in K direction, Fig. 8g. The last one stage, was population of the cells model, Fig. 8h.

Figure 9. (A) Schematic representation of the termination and geometry of the clinoforms and sequences, determining progradations found on RGC, i.e. topset, bottom and foreset (B) Dip seismic lines interpretation (D1-lowest- to DVI) and the interpretation of horizon and progradational sequences. Basal sequence placed by slumps, turbidites or gravitational flows that intermediate is characterized by foreset sequence that comprise sediments, debris flow, mass transport complex.

Figure 10. Evolutive model of stratigraphy and structural framework for the Rio Grande Cone. Those packages were settle into the master fault, with thickness progradants sequences giving places to lowstand system regressive deposits (Fig. 10A), with few structural influence, except by

the presence of the master fault; followed by the retrogradational sequences deposition, that represent the transgressive system (Fig. 10B). This sequence is crossed by faults (normal faults) located at the northeast of the cone area. Tertiary sediment accumulations show their maximum sediment supply during Middle Miocene. After that, the Pliocene to recent accumulation had registered a sedimentary charge lower than earlier periods. The last sedimentary deposition corresponds to the highstand regressive system, with abroad accumulation through the Middle Miocene (Fig. 10C).

Figure 11. Regional dip lines with seismic interpretation describing break shelf and cliniform and progradation sequences showing lateral migration and pitchout toward far offset. Surface lines correspond to possible lines for velocity model and correlation.

Figure 12. Seismic strike section and identification of different system channels complex. The yellow object corresponds to channel position, after geobody modeling.

Figure 13. Different flattened sequences describing the oriented and different classes compartmentalization of the actual geofoms, i.e. Channels and contourites.

Figure 14. Tridimensional computational model of the Rio Grande Cone, containing stratigraphy sequences, faults, channels and elements obtained from seismic interpretation.

Figure 1. Castillo et al.

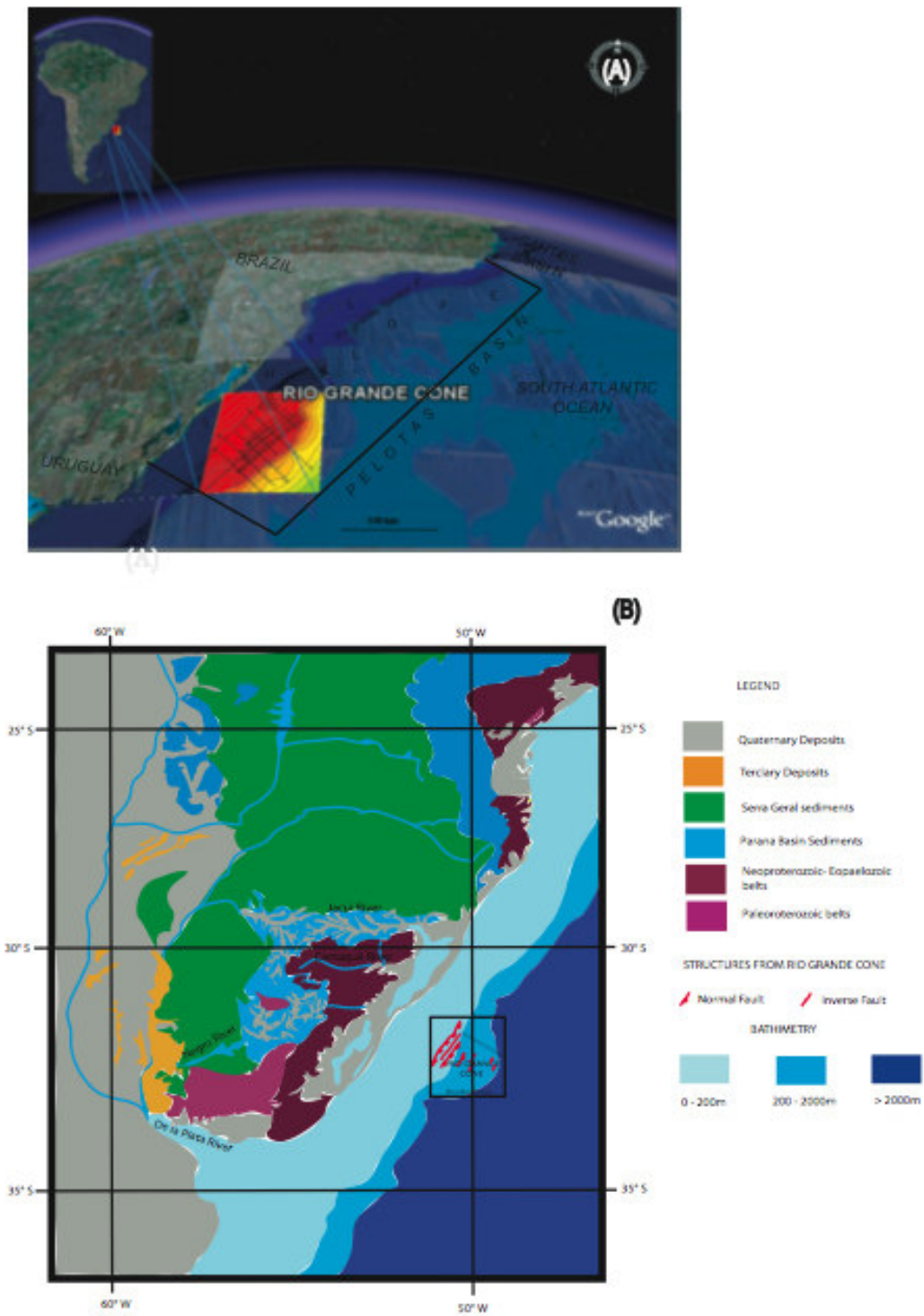


Figure 2 Castillo et al.

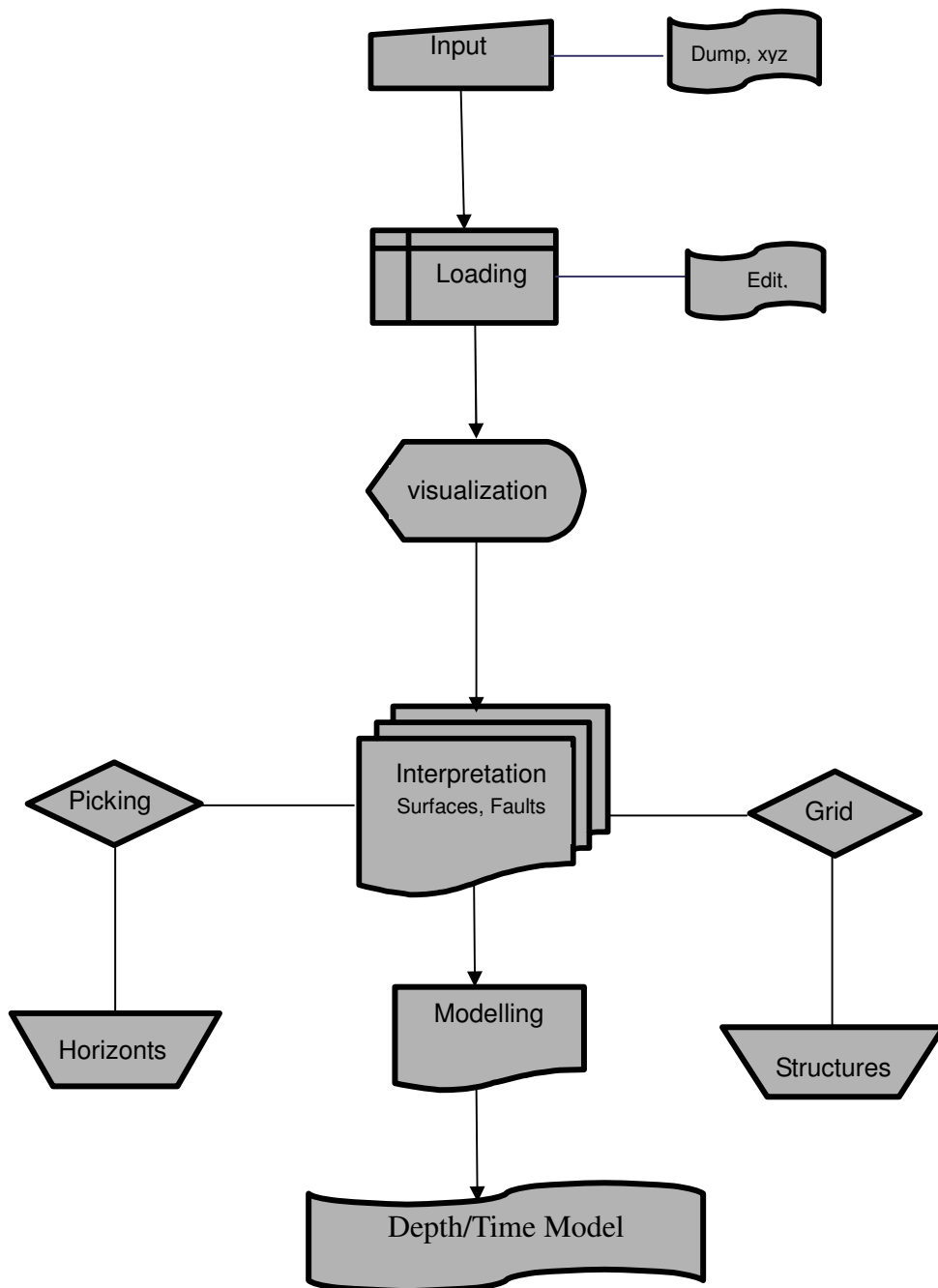


Figure 3. Castillo et al.

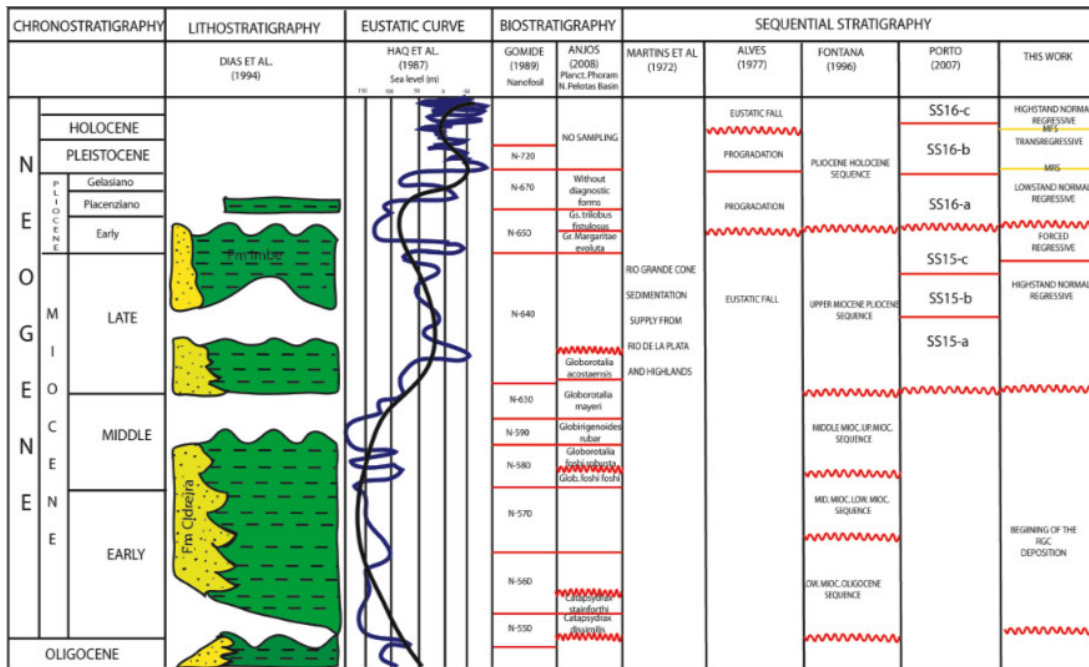


Figure 4. Castillo et al.

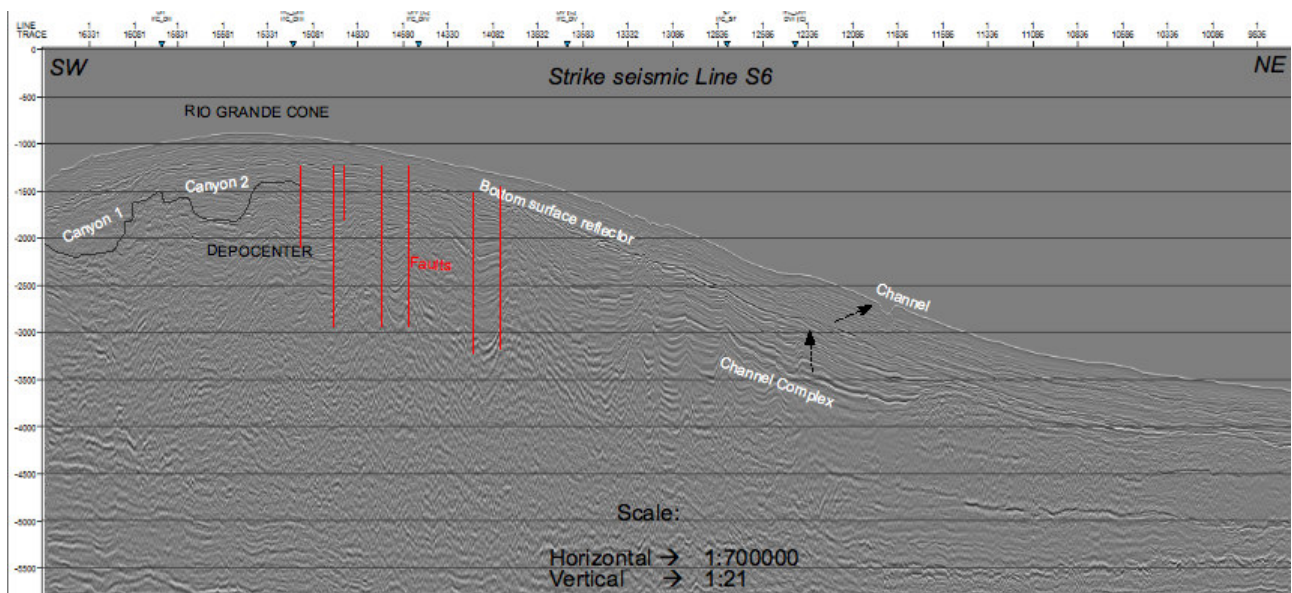
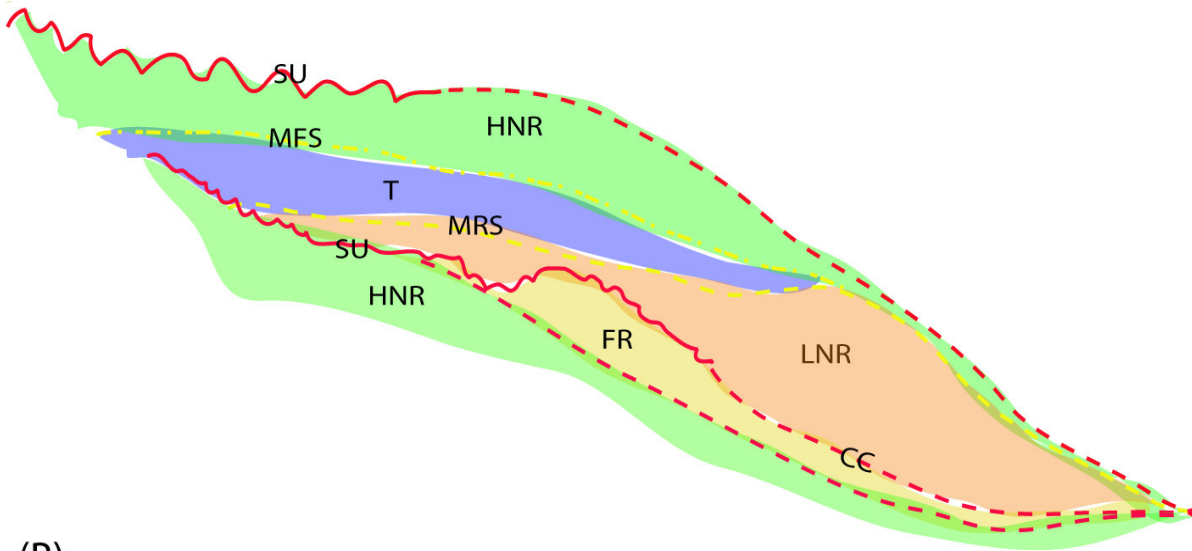


Figure 5 Castillo et al.

(A)



(B)

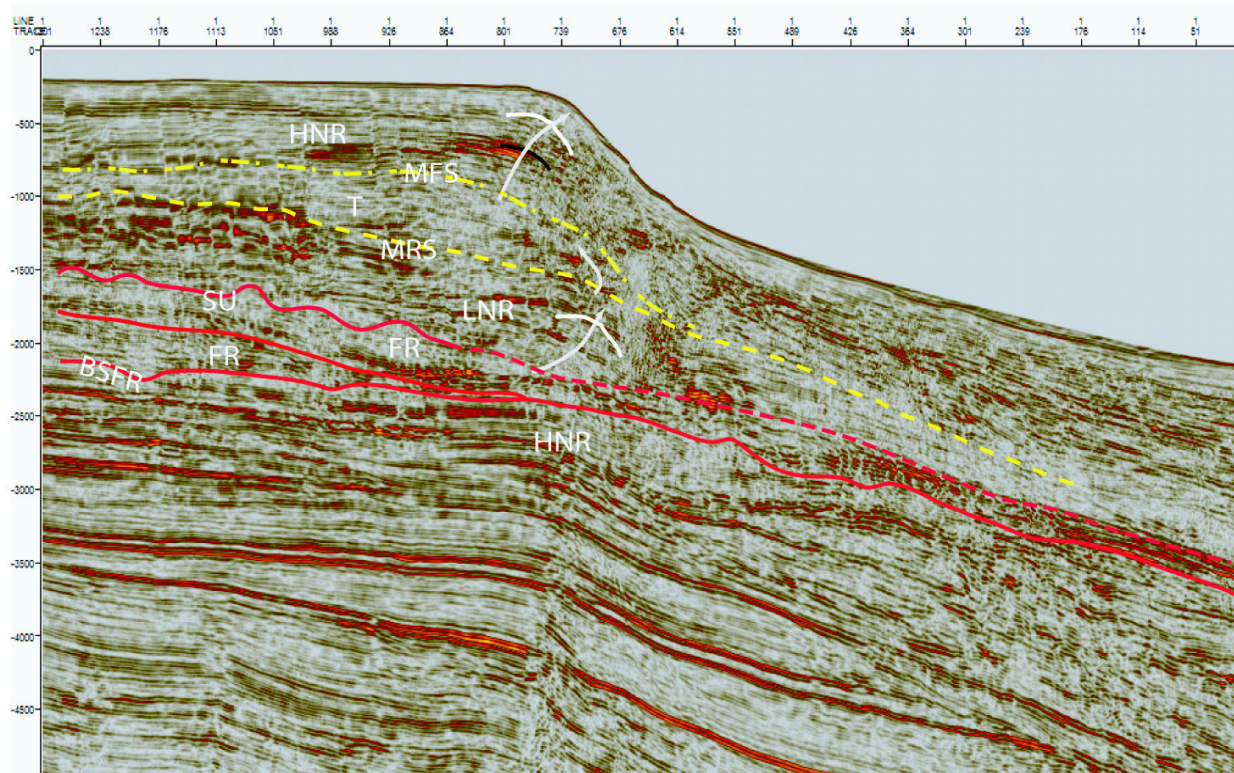


Figure 6. Castillo et al.

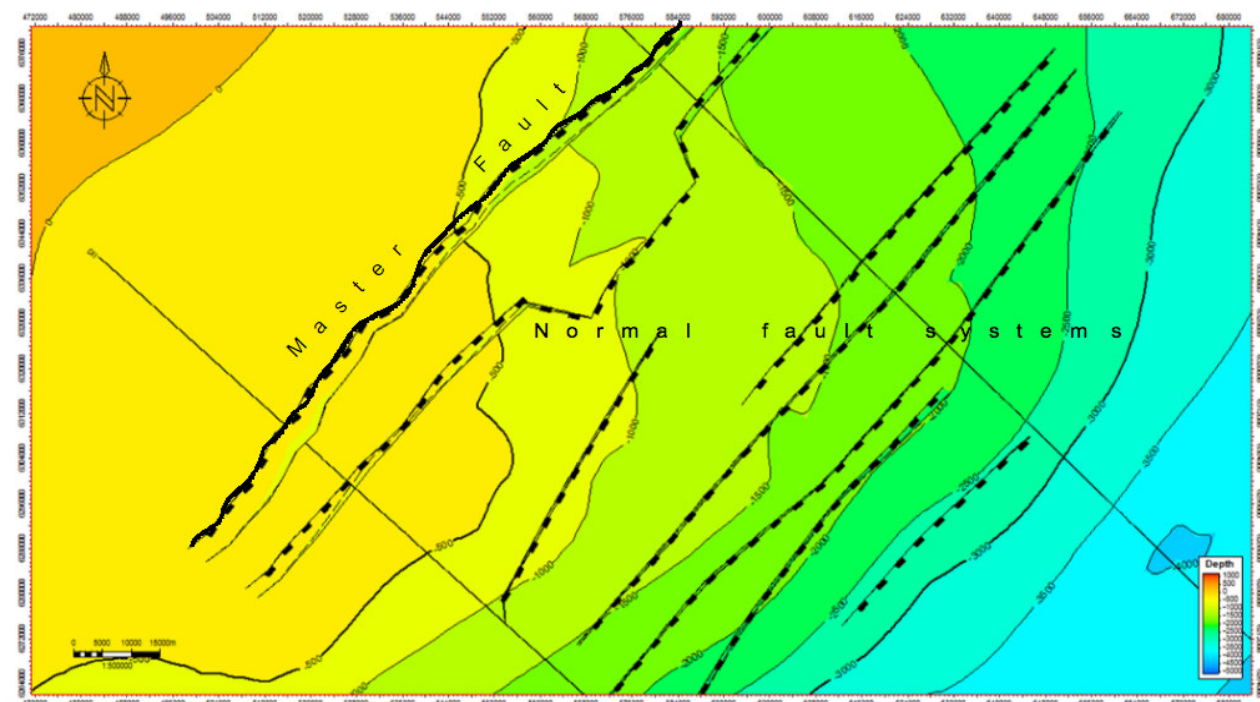


Figure 7. Castillo et al.

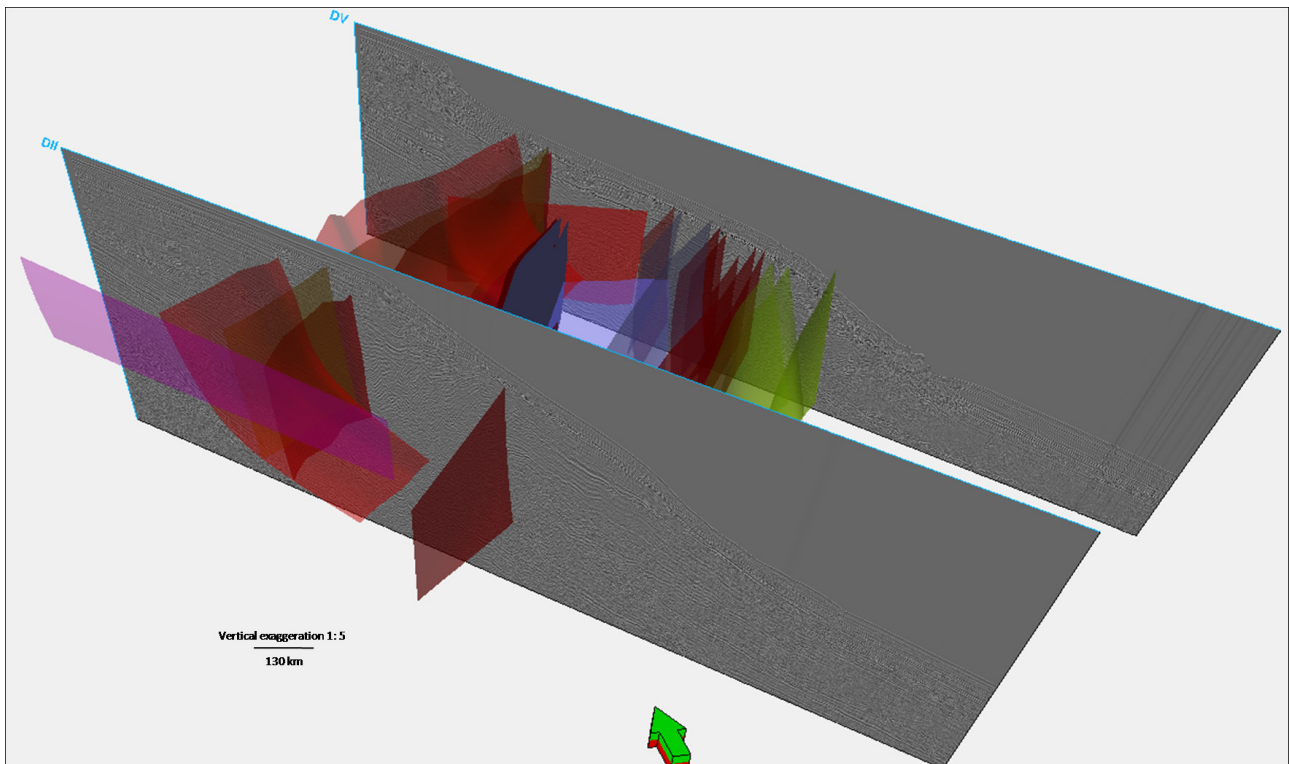
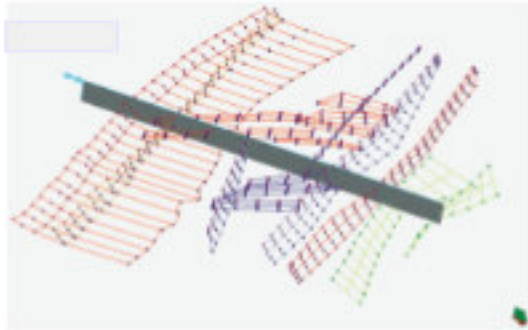
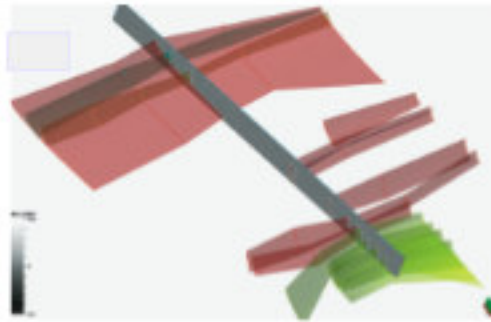


Figure 8. Castillo et al.

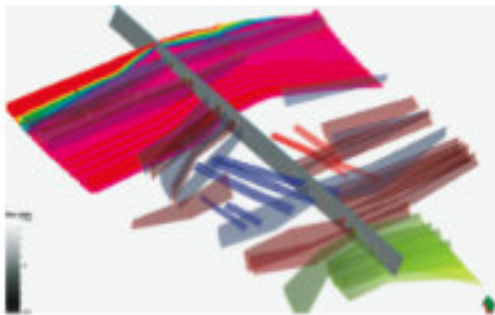
a) Fault sticks



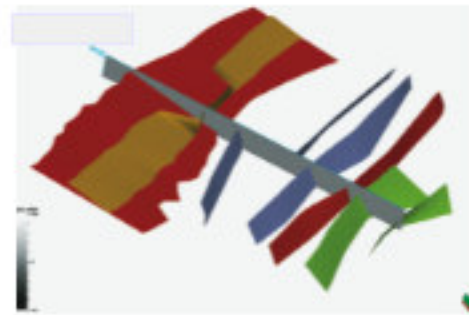
b) Plane edition



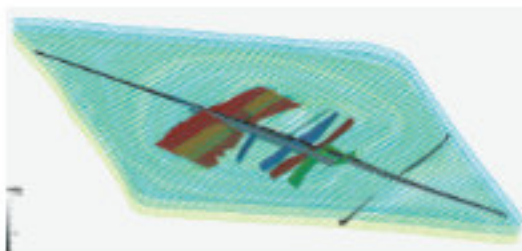
c) Fault surface generation



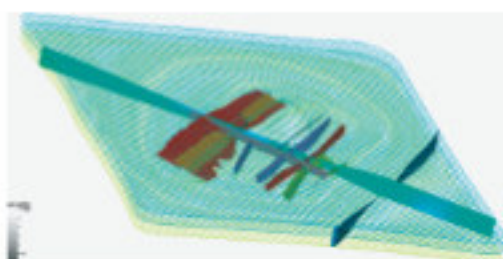
d) Gridding



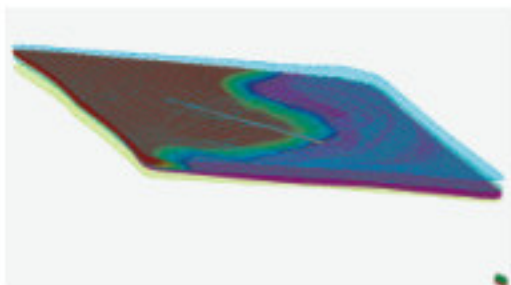
e) Boundary surfaces



f) Orientation



g) Horizon and structures



h) Transversal section

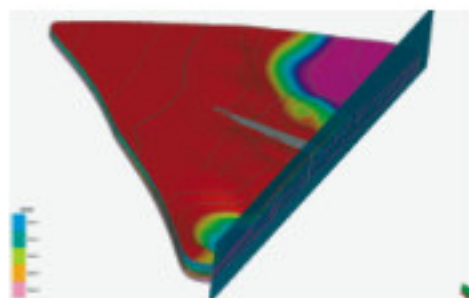


Figure 9. Castillo et al.

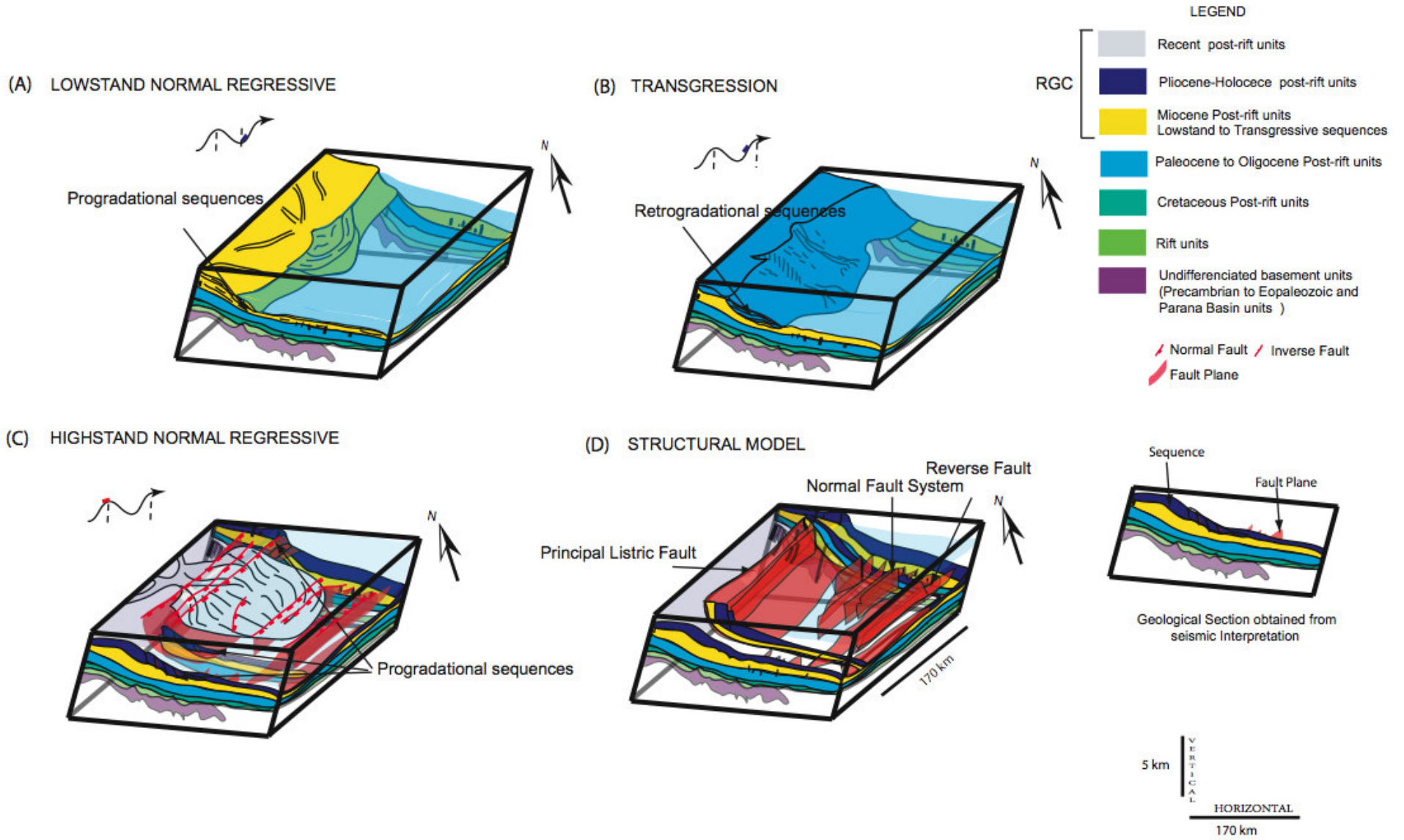


Figure 10. Castillo et al.

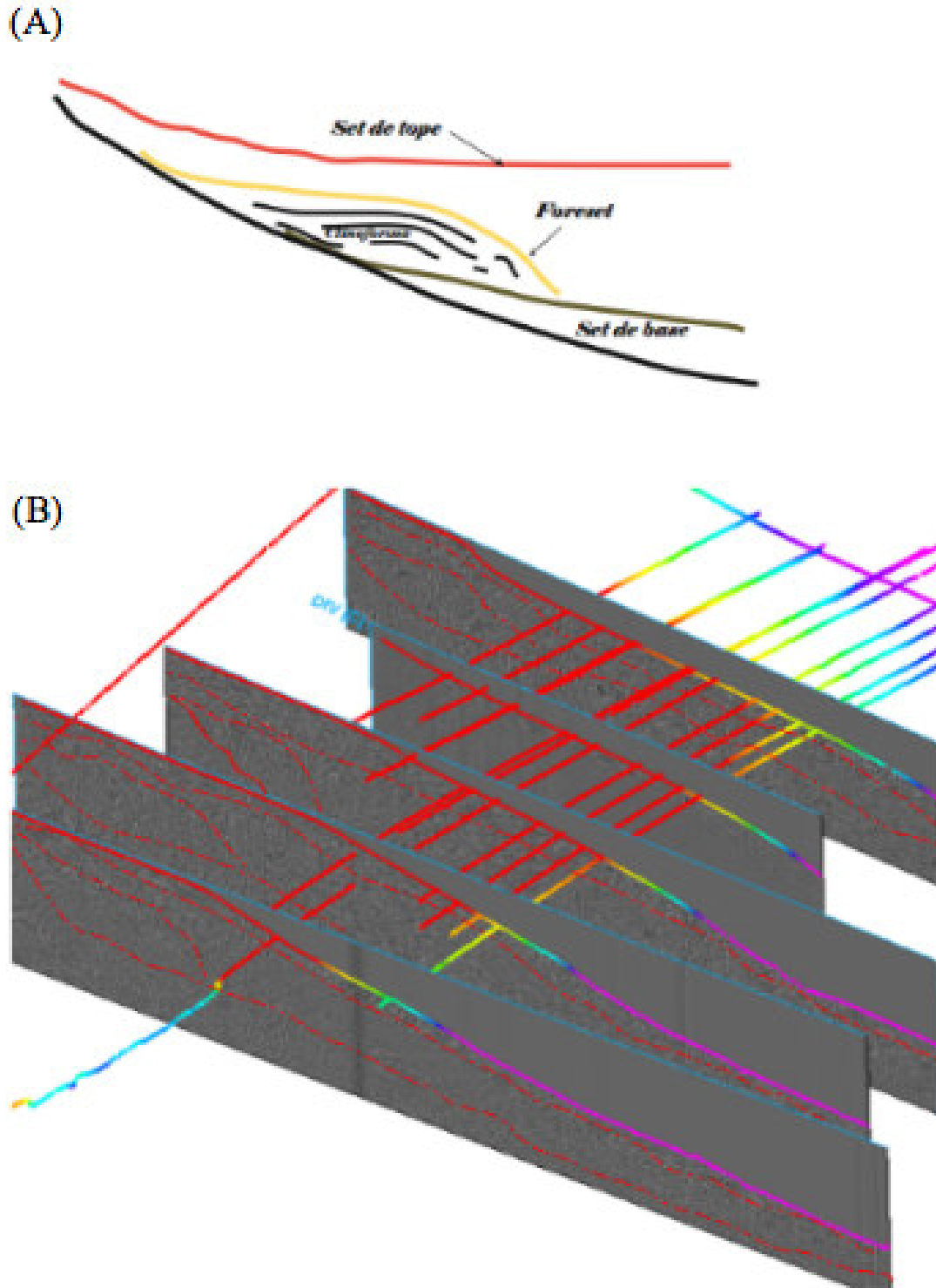


Figure 11. Castillo et al.

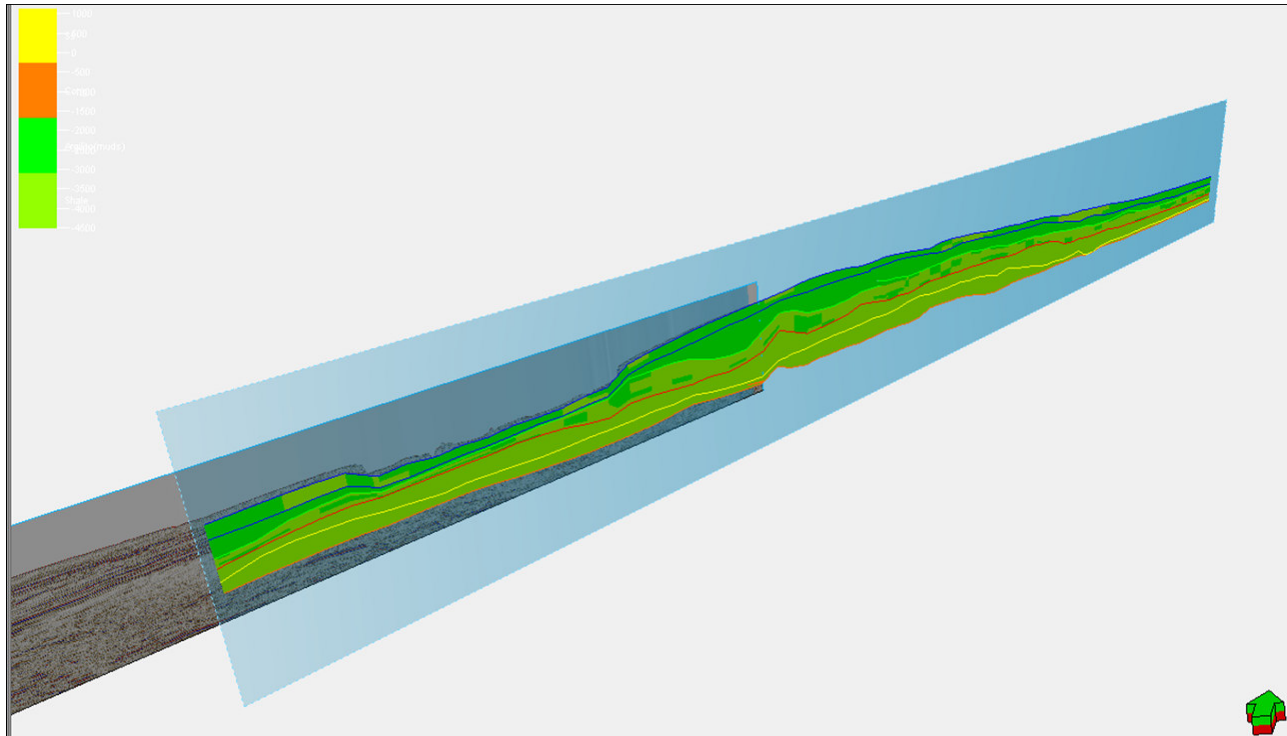
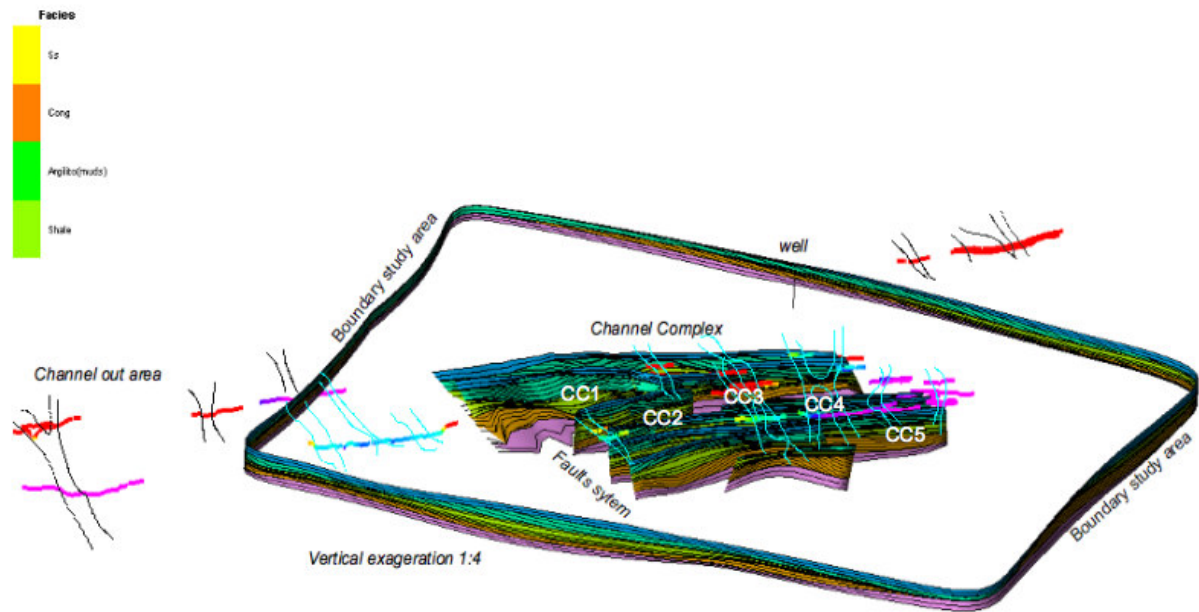


Figure 12. Castillo et al.



13. Castillo et al.

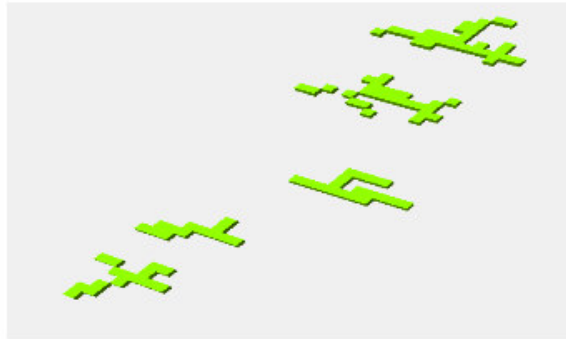
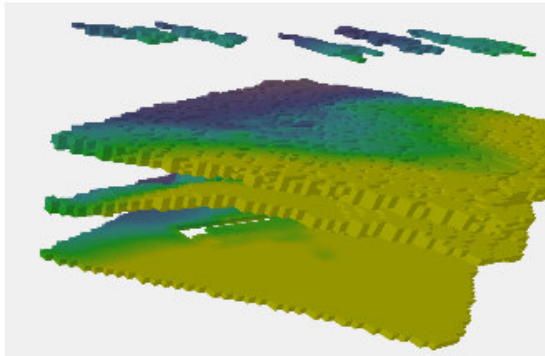
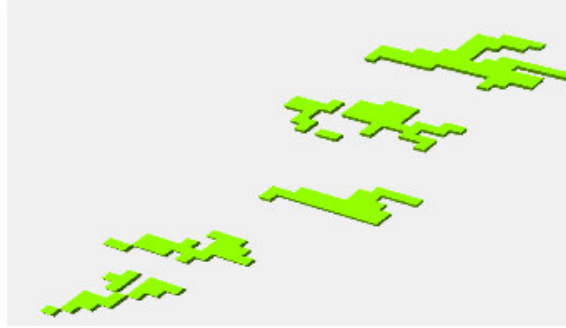
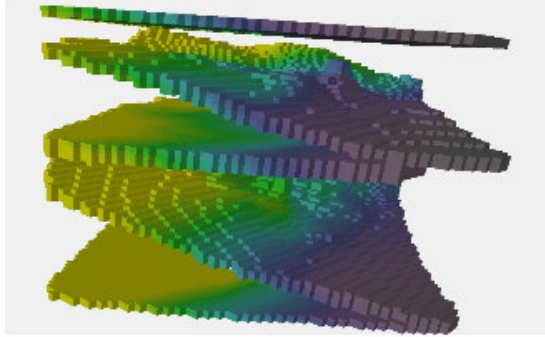
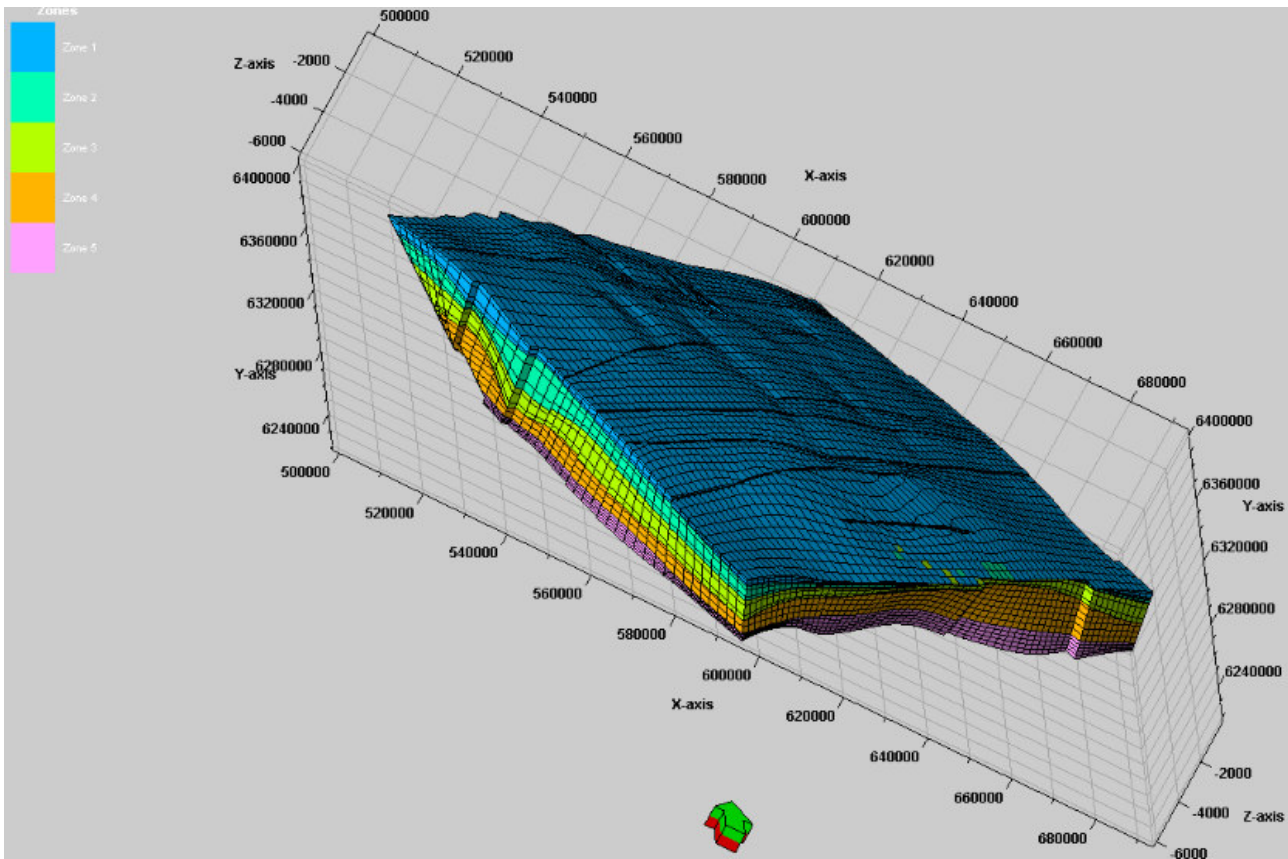


Figure 14. Castillo et al.



2.4 ARTIGO IV. ESTRATIGRAFIA DE SECUENCIAS EN UN MODELO DOS Y MEDIO DIMENSIONAL 2.5-D DEL CONO DE RIO GRANDE

ESTRATIGRAFIA DE SECUENCIAS EN UN MODELO DOS Y MEDIO DIMENSIONAL 2.5-D DEL CONO DE RIO GRANDE

Luis Antonio Castillo Lopez¹, Thais de Souza Kazmierczak² y Farid Chemale Jr.³

¹ Curso de Geofísica, Departamento de Geociencias – Universidad Nacional de Colombia. Ciudad Universitaria, Carrera 30 No. 45 – 03, edificio 224. Bogotá. Email: lacastillo@unal.edu.co, tel. (51) (71) 91943625.

² Schlumberger Servicios de Petróleo Ltda., Pituba Parque Center, av. Carlos Magalhães, 1034/436-A, Pituba – Salvador, Bahía – Brasil. Zip: 41850.000. Telf. (5571)3452-0085, Fax:(5571)3452-2911, email: tkazmierczak@slb.com.

³ Instituto de Geociências, Universidade Federal de Rio Grande do Sul Federal, Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43129. Cx.P. 15001. CEP 91501-970. Telf: (5551)3308.7140, Fax: (5551) 3308.7302. Porto Alegre – Brasil. Telf. farid.chemale@ufrgs.br

ABSTRACT

Geologic data extracted from depth seismic lines and velocity function permitted to obtain spatial information in different forms: lines (lineaments), vectors (Seismic sections), matrix (Three dimensional seismic), surfaces (Fault plane), polygons, grids (raster, structural model) that accompanied the visualization by means of interactive programs for an image approximation. They could be processed and modeled in other scales or configurations and the quality seismic lines and geologic mapping depend of sample rate, resolution, data type and computational resources, that interacting with seismostratigraphy interpretation is possible integrate geophysics, geomorphology, stratigraphy and sedimentology concepts and apply it to obtain an approximation to the subsurface feature. In this paper are showed pictures that correspond to Rio Grande Cone' s snapshot from the model development. Each figure represent one of the different step into implementation depth model, it is due that visualization resulted is a movie, where were included structural, stratigraphic and geomorphology interpretation.

Keywords: Geophysics, seismic interpretation, sequence stratigraphy, modeling and visualization.

RESUMEN

Datos geológicos extractados de líneas sísmicas profundas y función de velocidades permiten obtener información espacial, en forma de líneas (lineamentos), vectores (líneas sísmicas), matrices (sísmica tri-dimensional), superficies (planos de fallas), polígonos, mallas (raster, modelo estructural), que acompañan el modelamiento mediante la visualización por medio de programas interactivos para una aproximación de imágenes del subsuelo. La calidad del modelo y el mapeamento geológico dependen del intervalo de muestreo, resolución, tipo de dato sísmico y los recursos computacionales, que al interactuar con conceptos multidisciplinarios dentro de la geología, por ejemplo, integración de geofísica, geomorfología, estratigrafía y sedimentología, pueden ser vistas a partir de información sísmica. Este trabajo incluye varios snapshot que muestran instantes del modelamiento en profundidad del Cono de Rio Grande obtenidos del análisis sismoestratigráfico. Cada figura representa las etapas para implementar una aproximación de la geometría de los elementos geológicos del área de estudio. Esto dio como resultado un video con imágenes dinámicas de visualización, donde son condensados el análisis de la interpretación estructural, estratigráfica y geomorfología.

Palabras claves: Modelamiento sísmico, Geofísica, Sismoestratigrafía, Estratigrafía de secuencias.

INTRODUCCIÓN

El método de reflexión sísmica se constituye en una herramienta confiable y poderosa para el estudio y modelamiento del subsuelo, que no puede ser mapeado con otras técnicas

geofísicas. Además, los métodos de reflexión sísmica con la interpretación sismoestratigráfica puede ser clasificada, según la configuración utilizada, por ejemplo: secciones transversales (2D), extensiones fuera del plano (2,5D), volúmenes (secciones verticales y horizontales), o inclusive estudios 4D, que registran como varían los datos tridimensionales con el tiempo. El estudio sismoestratigráfico para el modelamiento puede constituir una metodología que permite construir el carácter geométrico y dinámico para la interpretación de facies estratigráfica y la reconstrucción de la historia geológica de una cuenca.

Modelamiento y visualización de datos sísmicos regularmente es efectuado con mallas de secciones buzantes y de rumbo, o en el mejor de los casos a partir de volúmenes o sísmica 3-D (Brown, 1996). Cuando no se cuenta con volúmenes de datos, secciones bi-dimensionales pueden permitir aproximaciones tridimensionales, sin embargo requieren de una función de velocidades. En este trabajo es realizado un modelamiento sismoestratigráfico 2.5-D, considerando líneas 2D, que pueden ser extendidas para una interpretación 2,5 dimensional. Esto es posible con un parámetro adicional, en este caso la extensión lateral no considerada en 2D, suponiendo una fuente puntual, como es el caso de un modelo sintético; en tanto para modelos analíticos puede considerarse una dirección adicional, por ejemplo, una paleo corriente, dirección de flujo o sentido de transporte. Modelos geológicos pueden ser analizados e desarrollados a partir de experimentación con modelos o configuraciones análogas (Sherlock and Evans, 2001).

AREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende a geoforma del Cono de Rio Grande, localizada en el *offshore* Atlántico del sureste Brasileiro. Se extiende desde la plataforma hasta el talud y parte de la planicie abisal, constituido predominantemente por sedimentos finos, en su mayor parte

lodolitas que ocupan gran parte de la geoforma con espesor variable de sus depocentros en el sector proximal y de hasta 3000 metros o más en el sector distal. Además de las características sedimentológicas, elementos estructurales son de gran relevancia en la geomorfología y estratigrafía.

[FIGURA 1]

MODELO DE VELOCIDADES

Las reflexiones sísmicas son importantes para la estratigrafía y se constituyen en el evento sísmico que es caracterizado por cambios significativos relacionados a la estratificación o a discordancias. Para el caso de superficies de estratificación, existen diferencias litológicas o texturales que reflejan el contraste de velocidad-densidad. Reflexiones generadas en la velocidad y densidad del medio. El evento de reflexión identificado en el registro sísmico puede ser causado por reflexiones de varias superficies de estratificación, caso de capas delgadas o eventos de otro plano (dos y medio Dimensiones, 2.5-D). Los registros sísmicos tienen características (o una firma) que pueden ser relacionadas a litología, espesura, espaciamiento o continuidad. La relación velocidad y densidad está contenida en las reflexiones, que permiten establecer una relación entre amplitudes y las ondas.

Las amplitudes son función de la Energía E de la onda sísmica, el espacio entre superficies reflectoras (contraste de velocidades y densidad, ρv) y la porosidad (presencia de fluido o gas) en la roca Φ_f , puede ser expresa como:

$$A(E, \rho v, \Phi_f), \quad (1)$$

donde, la amplitud es controlada por la energía de la onda o el contraste de velocidades y el espacio entre las superficies reflectoras, aumentando las amplitudes cuando las ondas se

encuentran en fase o reflejando energía. Además, la roca presenta poros, que pueden ser ocupados de fluido o gas, aumentando la amplitud.

Las velocidades sísmicas se constituyen así en un parámetro físico relevante, debido a su variación en los diferentes tipos de roca (Fig. 2). Esas velocidades en diferentes litología puede verse sobrepuesta, debido a variaciones de porosidad, de modo que la velocidad por si sola no es suficiente para distinguir tipos de roca, por ejemplo la velocidad de ondas sísmicas en areniscas de baja porosidad puede ser la misma para una roca calcárea con alta porosidad. La velocidad puede ser clasificada según los parámetros utilizados, por ejemplo, velocidad media, intervalar, de apilado, raíz cuadrática media (*RMS*), etc.

[FIGURA 2]

La velocidad asociada a la litología es la velocidad intervalar y se refiere a la velocidad media de las ondas sísmicas entre reflectores. Los perfiles de registro sísmicos fornecen información para determinarlas en unidades con predominio de lutitas, areniscas o calcáreos que pueden ser utilizadas para conversiones de tiempo a profundidad por medio de la velocidad en un modelo acústico o de velocidades. Los datos medios de la velocidad intervalar pueden variar en lutitas de 200 a 4600 m/s, en areniscas de 2800 a 5800 m/s y calcáreos entre 3800 a 6000 m/s. En cuanto a la velocidad RMS puede considerarse el equivalente a la velocidad de apilado (velocidad de procesamiento), en el caso de un reflector plano con offset pequeño, no siendo medible físicamente. Estas interpretaciones emplean métodos donde son consideradas modelos homogéneos y regulares. Mediante el presente estudio se pretende establecer una aproximación al modelo tridimensional contando con una malla de líneas 2D y la información de pozo, obteniendo un modelo final con velocidades a partir del dato sísmico y de log de velocidades. Así la evaluación e interpretación en un medio 2.5-D, el cual emplea datos bidimensionales (2-D), incluyen eventos fuera del plano, considerando una fuente de tipo puntual (o volumétrica). Esta

consideración establece un modelamiento geofísico, donde la velocidad de la onda varía a lo largo de dos coordenadas, permaneciendo constante en una tercera coordenada. Esta situación, conocida como modelo dos y medio dimensional (2,5-D), posee características típicas de muchas situaciones de interés en la exploración, por ejemplo, adquisición de datos sísmicos 2-D con receptores a lo largo de una línea sísmica con una fuente 3-D (Castillo *et al.*, 2002), o en caso de estudio para amenazas y microzonificación sísmológica (Slob *et al.*, 2002) o en la industria minera (Malehmir *et al.*, 2009).

El concepto de 2,5D puede ser extendido desde la adquisición de tipo sintético, para la interpretación y modelamiento geofísico o geológico. Esta situación es justificada debido a la limitante de los datos cuando no se cuenta con secciones en planta, por ejemplo el caso de configuraciones 1D o 2D. Para ello se hace necesario establecer un parámetro para extender la información fuera del plano. La geología no se limita a un solo plano, esta presenta variaciones laterales, que deben ser considerados con el conocimiento de las características y parámetros geofísicos en la interpretación estratigráfica. Otra consideración puede ser hecha al utilizar un modelo transversalmente isotrópico (isotrópico en la dirección vertical e anisotrópico verticalmente), así podemos tener un modelo 2,5D donde las secciones sísmicas consideradas (buzante y de rumbo) permiten interpretar estructuras y superficies estratigráficas con variaciones laterales. Esta consideración es hecha ya que los datos sísmicos migrados en 2D, especialmente secciones de buzamiento no presentan una buena aproximación al ser amarradas con las secciones de rumbo, por lo tanto las consideraciones hechas con parámetros geofísicos (velocidad, fuente) permiten una mejor aproximación para el modelo en profundidad.

INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA

Los datos recopilados corresponden a secciones sísmicas de costa afuera, interpretadas, usando criterios de estratigrafía de secuencias, a partir de trabajos previos del área. Las interfaces consideradas en el modelo fueron interpretadas de eventos laterales vecinos, donde se asume la misma velocidad lateral, y por condiciones de frontera y del principio de uniformidad esta se mantiene constante. Las interfaces correspondientes a los diferentes reflectores en el modelo, caracterizados por una velocidad constante en ambas capas y densidad constante en el modelo.

[FIGURA 3]

Estudios de modelamiento de cuencas y conversión a profundidad presentan evidencias de la existencia de función de velocidades normal para *shale*, por ejemplo, describen la relación lineal del incremento de la velocidad con la profundidad (Japsen, 2006; Storvoll *et al.*, 2006). La función de velocidades que describe el modelo cuya velocidad (V_p) varía linealmente con la profundidad (P) puede ser expresada como:

$$V_p = V_0 + K \cdot P. \quad (1)$$

Donde se considera una velocidad inicial del fondo de mar $V_0 = 1500 \text{ m/s}$, y una constante K que muestra una relación para una velocidad variable con la profundidad de 0.57, (Fig. 3).

La serie de sedimentos predominantemente de shale en el área del Cono de Rio grande, se caracteriza por una variación lineal con la profundidad, exceptuando los intervalos a 1250 a 1400 metros y a 1500-1550, 2000-2100, donde pueden ser observados inversiones de velocidades, que pueden ser asociadas a la presencia de material compactado, carga litostática y la porosidad. La compactación de sedimentos es controlada por su composición y los cambios

mecánicos y químicos durante el enterramiento, para el área de estudio, caracterizado por las facies de shale y lutitos, presentan una compresibilidad que varía por la presencia de diferentes minerales constituyentes. Estos parámetros para *shales* varían de forma que las respuestas en los registros sísmico y la sísmica varían (Storvoll *et al.*, 2006).

Para las velocidades de las líneas sísmicas fueron utilizadas cajas de velocidades del procesamiento (Velocidades de apilado), que aunque no son consideradas de lo mejor para un proceso de conversión o de modelamiento, es la única información disponible que se cuenta para el análisis e interpretación.

ESTADO DEL ARTE.

La aparición del método multicanal aplicado para la prospección y exploración del subsuelo, ha venido desarrollándose desde la década del 60's hasta hoy, mostrando el incremento de técnicas computacionales, de adquisición, procesamiento, interpretación y modelamiento (Fig. 4). La mayor difusión de los conceptos estratigráficos aparecen con la integración del método sísmico y la correlación con la curva de variación eustática (Vail *et al.*, 1977; Haq *et al.*, 1987; Van Wagoner *et al.*, 1988; Posamentier *et al.*, 1992; Posamentier & Allen, 1999). Después, sobresale la revisión en la publicación especial 42 de la SEPM en 1988 y en trabajos más recientes de Catuneanu (2006), a través de la interpretación sísmica y registros de pozo. En estas dos publicaciones son incluidos conceptos como secuencia deposicional y una metodología utilizando las terminaciones de los estratos e incluyen estudios de afloramiento.

[Figura 4]

El interés por un modelo 2,5-D surge como una herramienta aplicada regularmente en la etapa del procesamiento, con la necesidad de expandir el uso regular de datos 2D, para un estudio

llevado en lo posible para 3D, lo cual sería una buena aproximación para un modelo final. Estudios de sismoestratigrafía, muestran la relevancia en los avances de los métodos sísmicos, con análisis que permiten evidenciar la presencia de superficies de discontinuidades isócronas y superficies correlatas de continuidad, hacia cuenca adentro, con esto son reconocidas unidades deposicionales en cuencas sedimentarias y definida la cronoestratigrafía, basada en el posicionamiento temporal de las discontinuidades que limitan las unidades genéticas del depósito.

A partir de la sismoestratigrafía, y dentro de su resolución, los reflectores sísmicos siguen la estratificación que son bastante próximas a las líneas de tiempo, donde pueden ser observadas las relaciones geométricas de los diferentes paquetes sedimentares estableciendo unidades genéticamente relacionadas y cronoestratigráficas, estableciendo ciclos eustáticos detallados. En este punto la estratigrafía de secuencias puede ser entendida como la expresión en el registro estratigráfico de la historia de las variaciones del nivel del mar, debido principalmente a las variaciones eustáticas que permitan una correlación a escala global, punto bastante cuestionado (Miall, 1997).

La estratigrafía de secuencias ha sido ampliamente aplicada con diferente precisión e rigurosidad, por lo que es importante recalcar que debe ser considerado como una herramienta y no como un molde rígido. Debido a la aparición de una serie de modelos, términos, etc., que han hecho que la estratigrafía de secuencias se torne más confusa y dispersa en su finalidad. Es importante tener en cuenta que muchos de los modelos propuestos son resultado del análisis sísmico y no de observaciones de campo, con modelos de sedimentos siliciclásticos y adaptados para facies de carbonatos.

ESTRATIGRAFIA DE SECUENCIAS

Mediante la estratigrafía de secuencias puede ser descrito un conjunto de rocas, como estratos depositados durante procesos de retrogradación asociados a trasgresiones y separados de intervalos de no depositación o de progradaciones durante las regresiones. Los límites de esos intervalos pueden ser trazados mediante la sismoestratigrafía, asociados a factores eustáticos (por ejemplo, variaciones del nivel del mar), tectónicos o climáticos. Así, a partir del estudio de las discontinuidades, identificación de los aportes de sedimentos, unidades genéticamente correlacionables con herramientas sísmicas (Fig. 5), constituyendo la estratigrafía de secuencias.

[FIGURA 5]

La estratigrafía secuencial según los datos a analizar convergen en dos metodologías posibles, *driven-data* o *driven model based* referidas actualmente como empíricos e deductivos (Miall and Miall, 2004). En las últimas décadas modelos estratigráficos han sido divididos en sintéticos y analítico, según su objetivo. Los sintéticos envuelven la datación de modelos a partir de sucesiones estratigráficas locales, por ejemplo, la curva de ciclos globales de Haq *et al.*, (1987). Así, la edad de los depósitos se basa en sucesiones estratigráficas preservadas en la cuenca sedimentaria, predominando cambios eustáticos (*Eustasia*>*Tectónica*). Los modelos analíticos incluyen la litología como respuesta a las variaciones del nivel relativo del mar (*Eustasia*, *E*) y de la tectónica (*T*), (Posamentier et al., 1988). En este caso se emplea la sismoestratigrafía (o datos de afloramiento) para la interpretación y modelaje de las asociaciones de facies, permitiendo reconocer los límites que constituyen una cuenca sedimentaria. Se trata de determinar los materiales de aporte de la cuenca y el reconocimiento de las superficies de discontinuidades (*SD*) o las correspondientes superficies correlativas (*CC*) que corresponden a los

cambios en las condiciones de génesis que afectan toda la cuenca, estas unidades son designadas por unidades genéticas.

El estudio de toda la cuenca debe ser iniciado con los aspectos de tipo analítico, intentando reconocer las unidades genéticas, siendo necesario de la datación de los diferentes eventos, como también sus límites, por lo que debe considerarse toda la información posible. La disposición de las unidades genéticas, es hecho a partir de los datos de campo, con el reconocimiento de las discontinuidades a través de observaciones de campo o de subsuelo (sísmica, registros de pozo o núcleos). La datación debe ser utilizada integrando bioestratigrafía con datos magnetométricos.

El análisis sintético, puede considerarse como una etapa posterior, donde son hechas comparaciones con estudios homólogos en cuencas vecinas, y con datos a escala global, para verificar la concordancia con eventos de tipo local, regional o global. Entre esas superficies, las discontinuidades son las mas fáciles para ser identificadas, desde el punto de vista sismoestratigráfico (Fig. 6), ya que se presentan con gran extensión, contraste, y en cualquier dominio (espacial, temporal o de Wheler), por ejemplo en las márgenes de cuencas sedimentarias pasivas, donde cuenca adentro una discontinuidad pasa a ser una superficie de continuidad cuenca adentro (Catuneanu, 2006).

[FIGURA 6]

Estratigrafía de secuencias

Secciones sismoestratigráficas en cuencas de margen pasiva pueden ser modeladas en términos de secuencias estratigráficas, que permiten encontrar diferentes tratos o cortejos de sistemas (Fig. 7).

[FIGURA 7]

Sistema Regresivo de Mar Alto (SRMA)

El sistema regresivo de mar alto es el conjunto de sedimentos depositados cuando el nivel de mar está alto, caracterizado por progradaciones (Fig. 7), por ejemplo, cuando el transporte es suficiente, corresponden al avance de sistemas deposicionales deltaicos sobre los de plataforma y de estos sobre los de talud .

Sistema Regresivo de nivel de Mar Bajo (SRMB)

Este Sistema iniciado con la caída brusca del nivel del mar, donde algunas veces la plataforma es expuesta (subaérea) en superficie, después hay interrupción en la sedimentación y erosión, resultando en una discontinuidad sobre la que se depositan el sistema de nivel bajo. En secciones sísmicas puede ser vista como un montículo en secciones de buzamiento con *downlap* bidireccionales. Este sistema pueden ser: 1. abanico submarino LSBF – acumulaciones derivadas de la erosión de la plataforma y de las partes altas del talud en fase de nivel bajo; éste se posiciona encima del límite de secuencia, con presencia de turbiditos que dan una apariencia de montículos, con geometría tabular desarrollados durante el descenso relativo del mar; 2. la cuña de nivel bajo, ocurridas en el mínimo eustático constituido por sistemas deposicionales regresivos, acumulados sobre el antiguo talud, en el final del descenso rápido del nivel de mar, cuando la línea de costa se desplaza por el talud superior. En la base del cañón se individualiza un complejo de canales con facies hemipelágicas e intercalaciones de turbiditos no relacionados con abanicos. Aquí aparecen sistemas de canales complejos con terminaciones en *onlap* y *downlap* hacia el límite de secuencias, *downlap* hacia el abanico submarino y facies de canal/levee, slump y *slide* de gravedad (Fig. 7). Para el caso de sistemas de valles incisos, son caracterizados por *onlap* progradantes laterales y geometrías sigmoidales.

Sistema Transgresivo (ST)

Producida por la rápida subida del nivel del mar sobre áreas costeras, con depositación de sedimentos hemipelágicos sobre la plataforma, las condiciones, anteriores predominantemente regresivas, cambian y se instala un trato transgresivo, constituido por parasecuencias retrogradantes desarrolladas durante la subida relativa del nivel del mar. La superficie final del sistema transgresivo es la Superficie de Inundación máxima (*SIM*) en relación a la cual se depositan la sección condensada. Presenta *onlaps* sobre la plataforma con formas de depósito tangencial, terminados en *toplaps*.

METODOLOGIA Y MODELO

La metodología para interpretación y modelamiento casi-3D (q3-D) parte de una malla bidimensional, con líneas de rumbo y de buzamiento (Fig. 8), de las cuales son extraídas informaciones de horizontes, superficies y secuencias, determinadas durante la interpretación de secciones transversales y de pozo. A esa interpretación se sigue la correlación con los pozos, para corroborar el amarre interpretación sísmica, la que puede llevar a la ejecución de registros sintéticos para la conversión Tiempo-Profundidad. En casos extremos donde no se cuenta con datos de pozos, pueden ser utilizadas las velocidades de procesamiento de las líneas sísmicas (conocidas como las cajas de velocidades), para efectuar un modelo de velocidades, el cual se constituye en la aproximación para llevar una configuración de 2D para un modelo 2.5-D.

[FIGURA 8]

Este modelo permite establecer relación de profundidad y de posicionamiento de las diferentes elementos de las secuencias respectivas y obtener un modelo de estratigrafía de secuencias a partir de una configuración en profundidad. Para obtener un modelo en profundidad o tiempo, basado en datos bidimensionales, debe ser extendida la información desde cada una de las líneas sísmicas para fuera del plano, esto puede ser realizado con una función de velocidades creada con la interacción entre los datos de pozo y las cajas con velocidades sísmicas, ejemplo, las velocidades de procesamiento: apilado o de migración. El método básicamente permite extender y cambiar de dominio a través de las superficies que son las representaciones de los límites de secuencias. Conversiones de dominio y asignaciones de velocidades son hechas en los diferentes intervalos y aplicados a las interfaces de interés: Líneas de contorno, mapas e isopacos. Modelo con secuencias que pueden ser llevados del dominio temporal a espacial a partir de un modelo de velocidades variando linealmente con la profundidad.

Este modelo es inicialmente llevado desde el registro sísmico o las velocidades de migración o apilado, para la extensión lateral de los eventos sísmicos de buzamiento y de rumbo, los cuales van a presentar velocidades extendidas fuera del plano. Para efectos de simplicidad e por razones de resolución van a ser obviados las posibles inversiones de velocidad presentes. El modelo presentado de líneas de buzamiento, rumbo y pozo, localizadas en el offshore brasilero, permiten un amarre de la información, con procesos de conversión y modelamiento. La identificación de límites de secuencias y la flatenización de las superficies encontradas, ayudan a establecer una relación entre la dirección de depósito, previa selección de facies sísmica. La flatenización de horizontes (eventos), tomando como referencia uno de los horizontes como guía, permite el seguimiento de la dirección de depósito de los sedimentos, estableciendo su carácter progradante o retrogradante. Para este caso fue utilizado como referencia el horizonte qMi, a partir del cual fue llevada a cabo la flatenización de los demás eventos (Fig. 8).

Para llegar al modelamiento y visualización de la información sísmica fueron efectuados varios videos interactivos para: localización, estructuras, estratigrafía, geomorfología y modelo final del área del Cono de Rio Grande. Debido a esto fueron efectuados algunos instantes de los mismos para intentar describir los diferentes procesos. La información corresponde a líneas sísmicas (Fig. 9A) desplegadas en el área del cono (Fig. 9B), siendo referenciados en una malla (Fig. 9C), donde previamente se generaron elementos estructurales como fallas normales, inversas y transcurrentes (Fig. 9D), cuyas planos fueron incluidos dentro de la malla (Fig. 9E), a los que también fueron incorporados elementos estratigráficos como horizontes, discordancias limites estratigráficos, Fig. 9F), o elementos geomorfológicos como sistemas de canales (Fig. 9G). Toda esa información y aproximaciones permiten obtener un modelo preliminar del cual pueden ser visualizados otras características en forma de volumen o de secciones (Fig. 9H).

Diferentes geometrías y terminaciones sismoestratigráficas, son indispensables para determinar las características estratigráfica y de la estratigrafía de secuencias (Fig. 9), sin embargo visualizaciones pueden y deben ser asistidas por sistemas computacionales, mediante modelos del subsuelo, al que son aplicados técnicas virtuales (Lin and Loftin, 1998), mejorando la calidad y alcance. La visualización incluye algunas veces análisis de atributos o otros parámetros, que permiten destacar elementos geológicos o geofísicos, por ejemplo, estratificación, presencia de canales o cañones submarinos, geoformas posicionadas a profundidades.

[FIGURA 9]

CONCLUSIONES

Datos geofísicos, especialmente secciones sísmica y pozos, permiten implementar una interpretación sismoestratigráfica y de estratigrafía secuencial con integración de análisis de

velocidades, por ejemplo, una función de velocidades para una configuración extendida de un modelo bidimensional para un modelo 2.5D. Todo este proceso es justificado para conversión de datos de un dominio temporal a profundidad, además de la interpretación de datos con técnicas de estratigrafía secuencial, que se constituye en una de las herramientas más poderosas, que al ser implementadas a partir de datos sísmicos, permiten refinar y estipular modelos geológicos.

Cuando se definen la arquitectura geológica a partir de sus elementos geológicos, geofísicos o geomorfológicos, se hace necesario hacer el seguimiento de las variaciones en diferentes direcciones, vertical o lateral, consideraciones que no son hechas, regularmente si se supone continuidad homogénea, o cortes transversales. Por lo que se hace necesario hacer una extensión con modelos que incluyan ese seguimiento, lateral y vertical, lo cual puede efectuarse con la funciones de velocidades en sentido del flujo externo a las secciones analizadas.

El modelamiento estratigráfico es basado en el análisis geométrico, de facies, sismoestratigrafía y la correlación con un pozo disponible para el área, datos que son limitados debido a la gran extensión del área y al poco muestreo, integrando datos de una malla 2D y un pozo 1D.

La visualización de datos sísmicos constituye una herramienta poderosa para asistir las etapas de adquisición, procesamiento, interpretación y modelamiento geológico, por ejemplo el análisis sismoestratigráfico. En este trabajo fueron usadas como herramientas módulos de geofísica, petrofísica e interpretación de Petrel, para delinear elementos estratigráficos, estructurales y geomorfológicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Federal do Rio Grande do Sul, por el soporte y la formación del primer autor durante la permanencia en el curso de doctorado en estratigrafía, y a la Universidad Nacional de Colombia por el financiamiento. A Schlumberger - Brasil por el soporte computacional del modulo de modelamiento e interpretación Geofísica de Petrel 2008.1. Este trabajo hace parte de la formación para el curso de doctorado en la Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (Brasil).

REFERENCIAS

Alves, E. C. Estrutura rasa do talude e sopé da Margem Continental do Rio Grande do Sul e Uruguai. Tese de Mestrado. Inst. Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 77p., 1977.

Brown, A. Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data. American Association of Petroleum Geologist, Fourth Edition. p.424., 1996.

Butler, L.W. Shallow structure of the continental margin southern Brazil and Uruguay. Geological Society of America Bulletin, New York, N.Y., V.81. pp. 1079-1096., 1970.

Castillo, L. A.; Cruz, J. C.; Garabito, G.; Urban, J. Migração 2,5-D com amplitudes verdadeiras em meios com gradiente constante de velocidade. RBGf. Vol. 20. No. 1. , 2002.

Catuneanu, O.; Martins-Neto, M. A.; Ericksson, P. G. Precambrian sequence stratigraphy. Sedimentary Geology 176. p. 67-95., 2005.

Catuenanu, O. Principles of sequence stratigraphy. Elsevier's sciences & Technology. British Library. 375 pp., 2006.

Chopra, S. and Marfurt, K. J. Seismic attributes – A historical perspective. Society Exploration Geophysicists 75th Anniversary. Geophysics, Vol. 70, No. 5. 26 p., 2005.

Christopher, L. Timeline data. American Association of Petroleum Geologist–EXPLORER., 2008.

Fontana, R. L. Evidências Geofísicas da presença de Hidratos de Gás na Bacia de Pelotas – Brasil. 1o Cong. Soc. Bras. Geofísica, Vol.1., 1989.

Fontana, R. L. Geotectnia e sismoestratigrafia da Bacia de Pelotas. Plataforma de Florianópolis. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS. 214p., 1996.

Friedman, M. G. Sedimentology and stratigraphy in the 1950's to mid-1980s: The story of a personal perspective. Episodes. Vol. 21. no. 3. New York. USA., 1998.

Gonçalves, A.; Oliveira, M. A. & Oliveira, M. S. Geologia da Baía de Pelotas e da Plataforma de Florianópolis. Boletim Técnico da Petrobrás, RJ. 79: 157-174., 1979.

Haq, B. U.; Hardenbol, J.; Vail P. R. Chronology of fluctuations sea Levels since the Triassic (250 years ago to Present): Science, vol. 235, p.1156-1167., 1987.

James, H., Bond, R.; Eastwood, L. Direct visualization and extraction of stratigraphic targets in complex structural settings. *In*: Davies, R.J., Cartwright, J.A., Stewart, S.A., Lappin, M., Underhill, J.R., Eds, 3D Seismic technology: Applications to the Exploration of Sedimentary Basins. Geological Society, London, Memoirs **29**, pp. 227-234., 2004.

Japsen, P. Velocity-depth trends in Mesozoic and Cenozoic sediments from the Norwegian Shelf: Discussion. AAP Bulletin 90, No.7, pp.1141-1143., 2006.

Li, X.; Götze, H. J. Comparacion of some gridding methods. Leading edge, august. p. 898-900., 1999.

Lin, Ch. R.; Loftin B. Application of Virtual Reality in the Interpretation of Geoscience data. Virtual Environment Technology Laboratory, University of Houston. Taipei (Taiwan)., 1998.

Malehmir, A.; Thunehed, H.; Tryggvason, A. The Paleoproterozoic Kristineberg mining area, northern Sweden: Results from integrated 3D geophysical and geologic modeling, and implications for targeting ore deposits. *Geophysics* 74 (1), p.B9-B22., 2009.

Martins, I. L. Modelo Sedimentar do Cone de Rio Grande. tese de Doutorado. Instituto de Geociências, universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 205p., 1983.

Martins, L. R.; Martins, I. R.; Urien C. M. Episódios Dinâmicos de Curta Duração na Margem Continental do Rio Grande do Sul: Registro e Importância. *Acta Geológica Leopoldensia* 29 (2), 9-22. Sao Leopoldo. Brasil., 1990.

Miall, A. The Geology of Stratigraphy Sequences. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Germany. 432p., 1997.

Miall, A. and Miall, C. H. Empiricism and model-building in stratigraphy: Around the hermeneutic circle in the pursui of stratigraphic correlation. *Stratigraphy* 1, pp. 27-46., 2004.

Mitchum, M. R. Jr.; Sangree, J.; Vail, P.; Wornardt, W. Recognizing Sequences and System Tracts from Well logs, Seismic Data, and Biostratigraphy: Examples from the late Cenozoic of the Gulf of Mexico. In: Weimer, P.; Posamentier, H. W. (eds). *Siliciclastic sequence stratigraphy: recent developments and applications*. American Association of Petroleum Geologist, Memoir, **58**. p. 163-197., 1994.

Pennington, W. An introduction to this special issue: Computer applications Leading Edge, p.700., 1999.

Porto, R.A. Interpretação Sismoestratigrafica da Porção da Bacia de Pelotas que engloba o Cone de Rio Grande e a Avaliação do seu Potencial Petrolífero. Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Macaé/RJ., 2007.

Posamentier, H. W.; Allen, G. P.; James, D. P.; Tesson, M. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples, and exploration significance: American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, vol.76, p. 1687-1709., 1992.

Posamentier, H. W.; Jervey, M. T.; Vail, P. R. Eustatic controls on clastic deposition I. Conceptual framework. *In*: Wilgus, C. K.; Hasting, B.S.; Kendall, C. G. S. T. C.; Posamentier, H. W.; Ross, C. A.; Van Wagoner, J.C. (Eds), Sea Level Changes-An integrated Approach, Vol. 42. SEPM Special Publication, pp.110-124., 1988.

Posamentier, H. W. and Allen, G. P. Siliciclastic Sequence Stratigraphy: concepts and applications: SEPM concepts in Sedimentology and Paleontology, vol. 7, 210p., 1999.

Sherlock, D. H. and Evans B. J. The development of seismic reflection sandbox modeling. AAPG Bulletin, v.85, No9., pp. 1645-1659., 2001.

Slob, S.; Hack, R.; Scarpas, T.; Bemmelen, B.V.; Duque, A. A methodology for seismic microzonification using gis and shake – A case study from Armenia, Colombia. Engineering Geology for Developing Countries. South Africa, 16-20 September., 2002.

Storvoll, V.; Bjorlykke, K.; Mondol, N. Velocity-depth trends in Mesozoic and Cenozoic sediments from the Norwegian Shelf: Reply. AAPG Bulletin, V. 90, No.7, pp. 1145-1148., 2006.

Trauth M. H. Matlab® Recipes for Earth Sciences. 2nd Edition. Springer -Verlag Berlin. University of Potsdam, Germany. 2006.

Tucker, M. P. and Yorston, J. H. Pitfalls in Seismic Interpretation. Paul C. Wuenschel ed. Society Exploration Geophysicists. 50p., 1985.

Urien, C. M.; Martins, L. R.; Martins, I. R. Paleoplateformas e Programação Deltaica do Neogeno na Margem Continental do Uruguai e Norte a Argentina. Gravel 1, 40-46. Porto Alegre – Brasil., 2003.

Vail, P. R.; Mitchum, R. M.; Thompson, S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 4. Global cycles of relative changes in sea level, in C.E. Payton, (ed), Seismic stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration: AAPG Memoir 26, p.83-97., 1977.

Van Wagoner, J. C.; Posamentier, H. W.; Mitchum, R. M.; Vail, P. R.; Sarg, J. F.; Loutit, T. S.; Handenbol, J. An overview of sequence stratigraphy and key definitions. In: Wilgus, C. K.; Hastings, B. S.; Kendall, C. G. S. T. C.; Posamentier, H.W.; Ross, C. A.; Van Wagoner, J. C. (Eds.), Sea Level Changes – An Integrated approach, vol.42. SEPM Special Publication, pp. 39-45., 1988.

LISTA DE FIGURAS

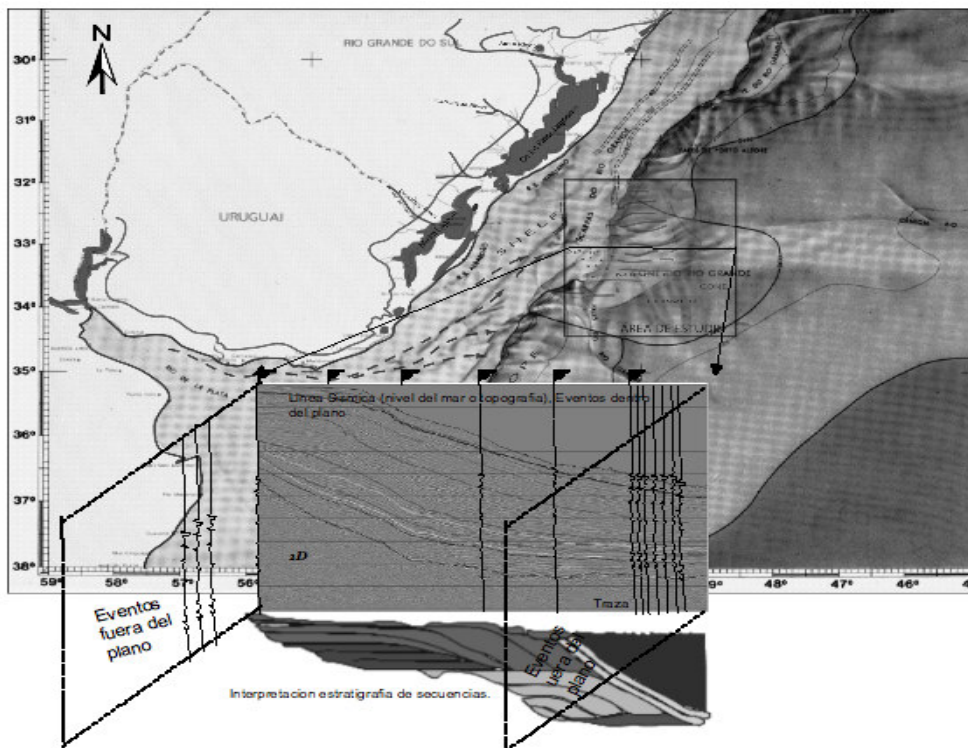


Figura 1. Modelo sísmico 2,5-D en el dominio CDP (*Zero offset configuration*), el plano central corresponde a la línea y las trazas (dentro del plano). Datos fuera de la línea sísmica no puede ser considerado, motivación para asumir un modelo 2,5-D.

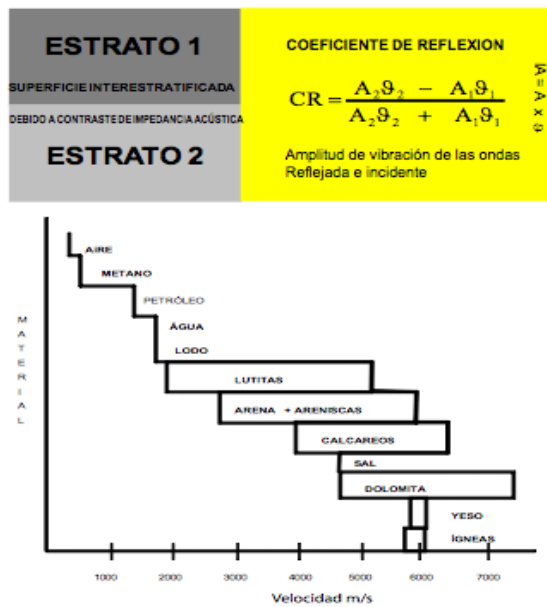


Figura 2. Superficies geológicas límites que dan como resultado la impedancia acústica, en superficies estratificadas del subsuelo y pueden ser determinadas a partir de la relación de la reflexión con amplitudes y velocidades.

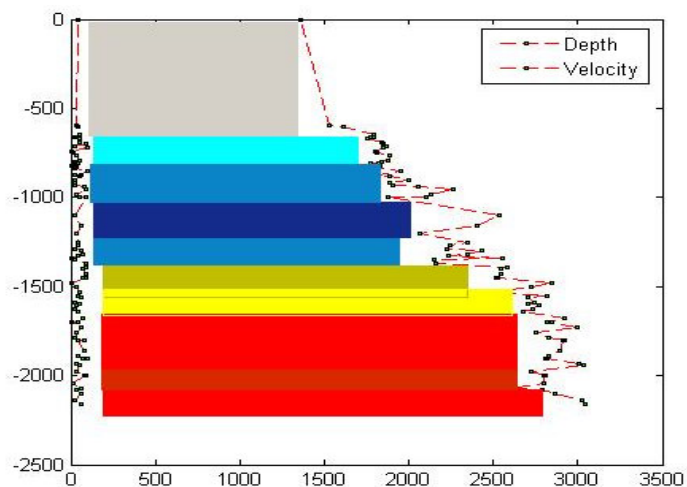


Figura 3. Modelo de velocidad obtenido a partir de registros (1D), a ser expandido para la sección sísmica e interpolación para configuración 2,5D a casi-3D.

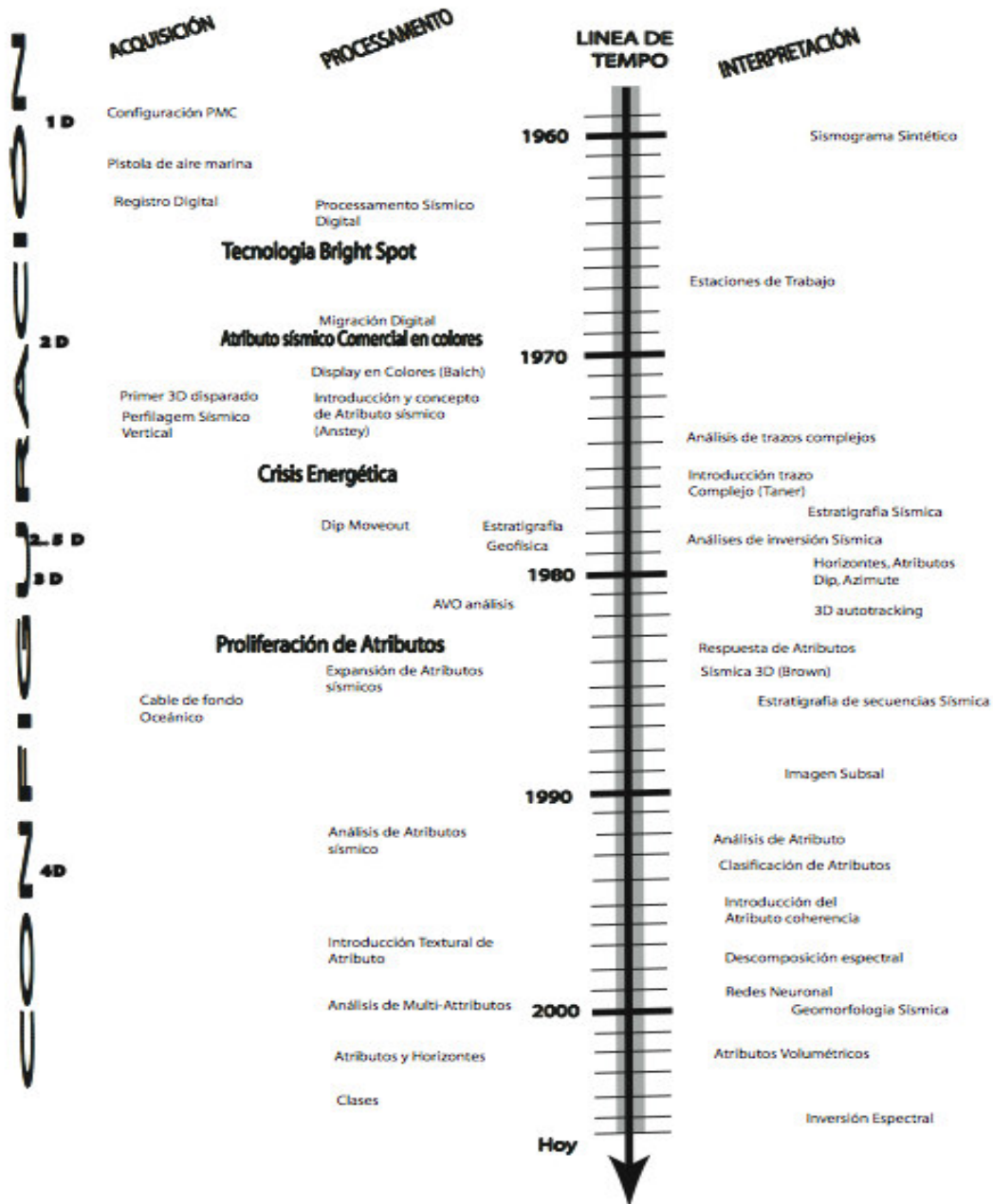


Figura 4. Histórico y evolución de la visualización de datos sísmicos desde el primer registro (1D), hasta el análisis de multiatributos (clases) de hoy. Adaptado de Friedman (1996), Chopra and Marfurt (2005) y Christopher Liner (2008).

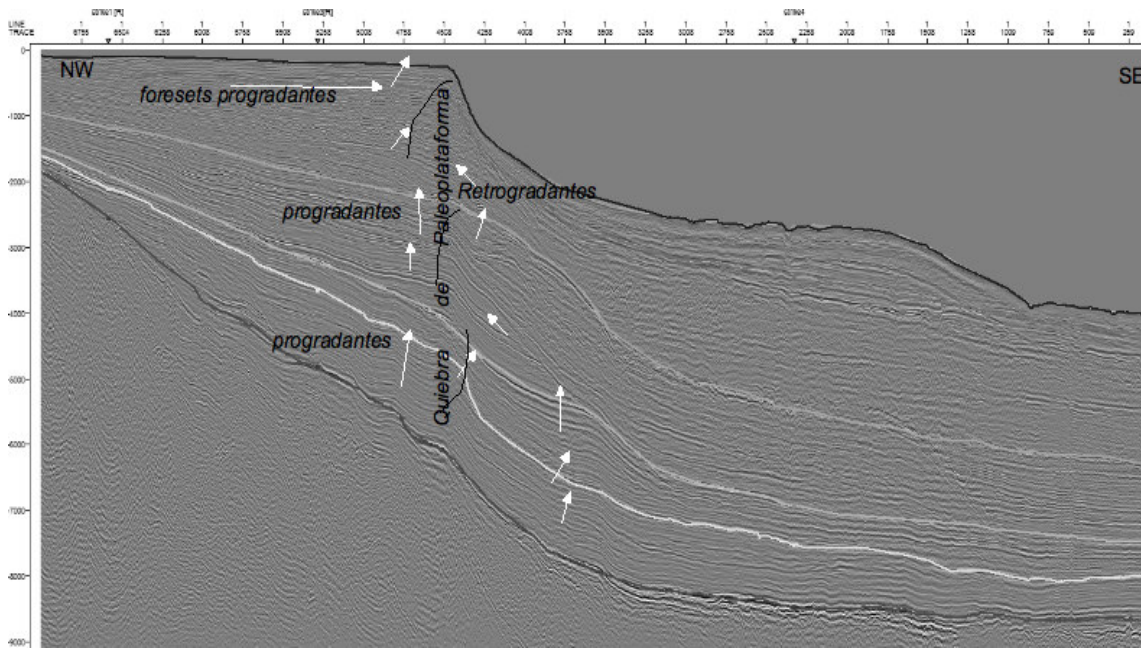


Figura 5. Imagen de sección sísmica buzante con la identificación de diferentes secuencias sísmicas limitadas por discontinuidades y sus concordancias relativas, separando procesos de retrogradación de no deposición o de progradaciones. Las flechas permiten identificar el sentido de la deposición (Progradación, retrogradación o agradación).

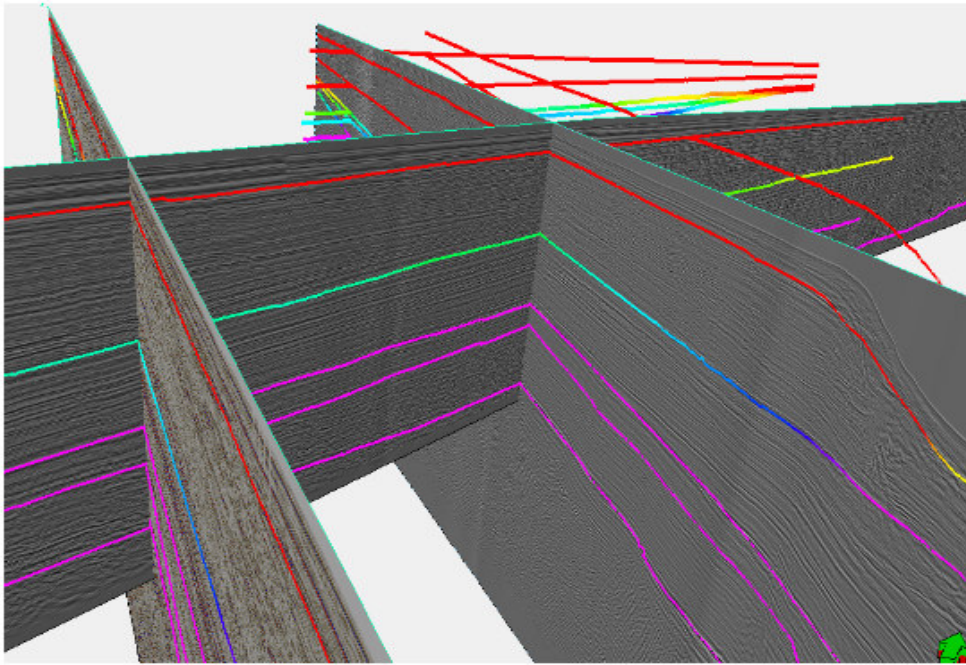


Figura 6. Seguimiento lateral de los límites de secuencias interpretadas en secciones sísmicas de rumbo y buzantes. La secuencia deposicional correspondiente a los estratos genéticamente relacionados, relativamente concordantes, limitados en el tope y la base por discontinuidades con su continuidad correlativas.

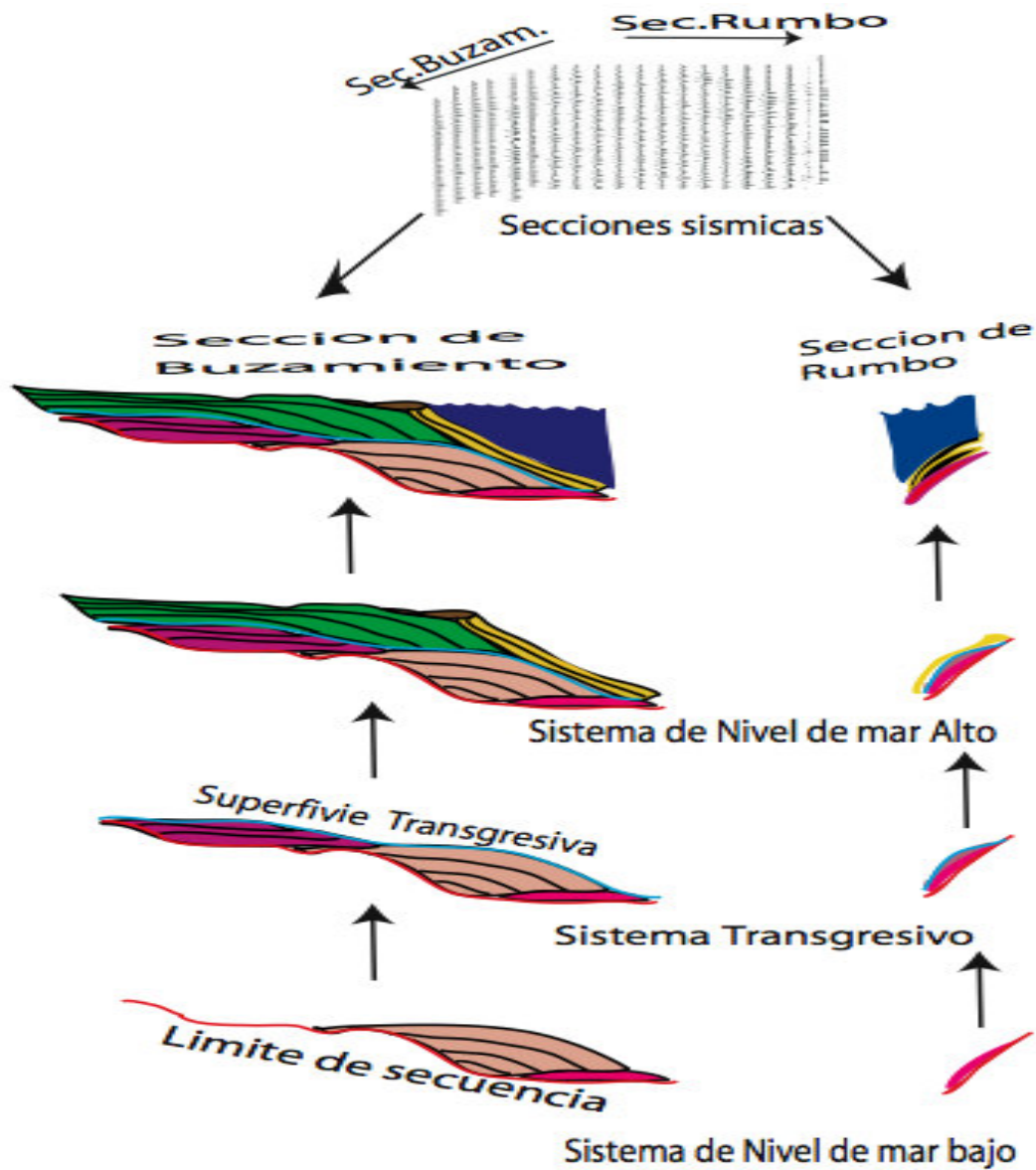


Figura 7. Modelo de secuencias con diferentes dominios (Temporal y espacial). El dato de entrada está compuesto por secciones (de rumbo y de buzamiento), a partir de las cuales son obtenidas superficies guías, que pueden ser correlacionadas cronoestratigráficamente, y asignarse una función de velocidad para llevar a otro dominio, y establecer horizontes flatenizados y ser interpretados como estratigrafía secuencial.

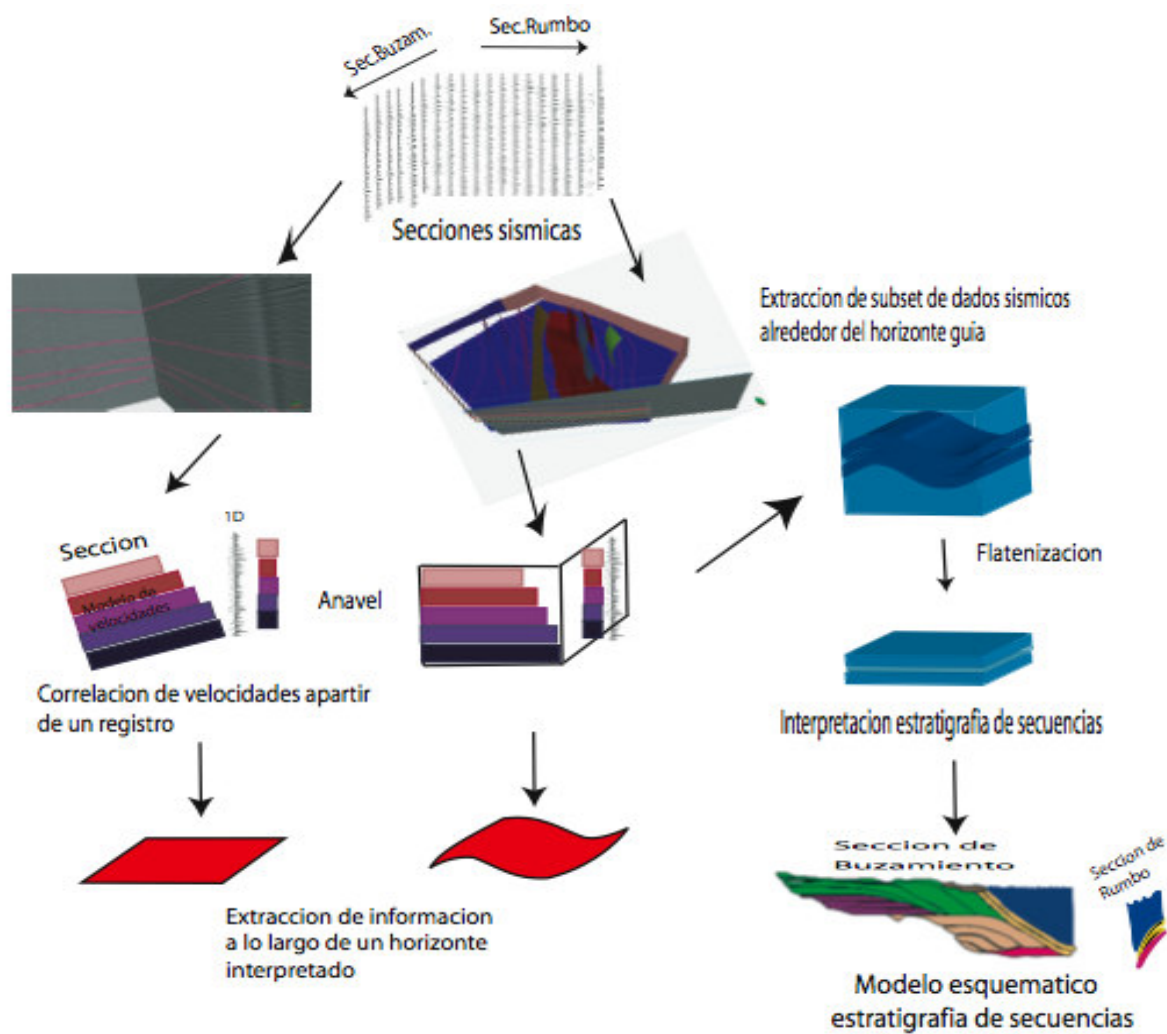


Figura 8. Diagrama esquemático de un modelo de estratigrafía secuencial en secciones de buzamiento y rumbo con los diferentes sistemas encontrados.

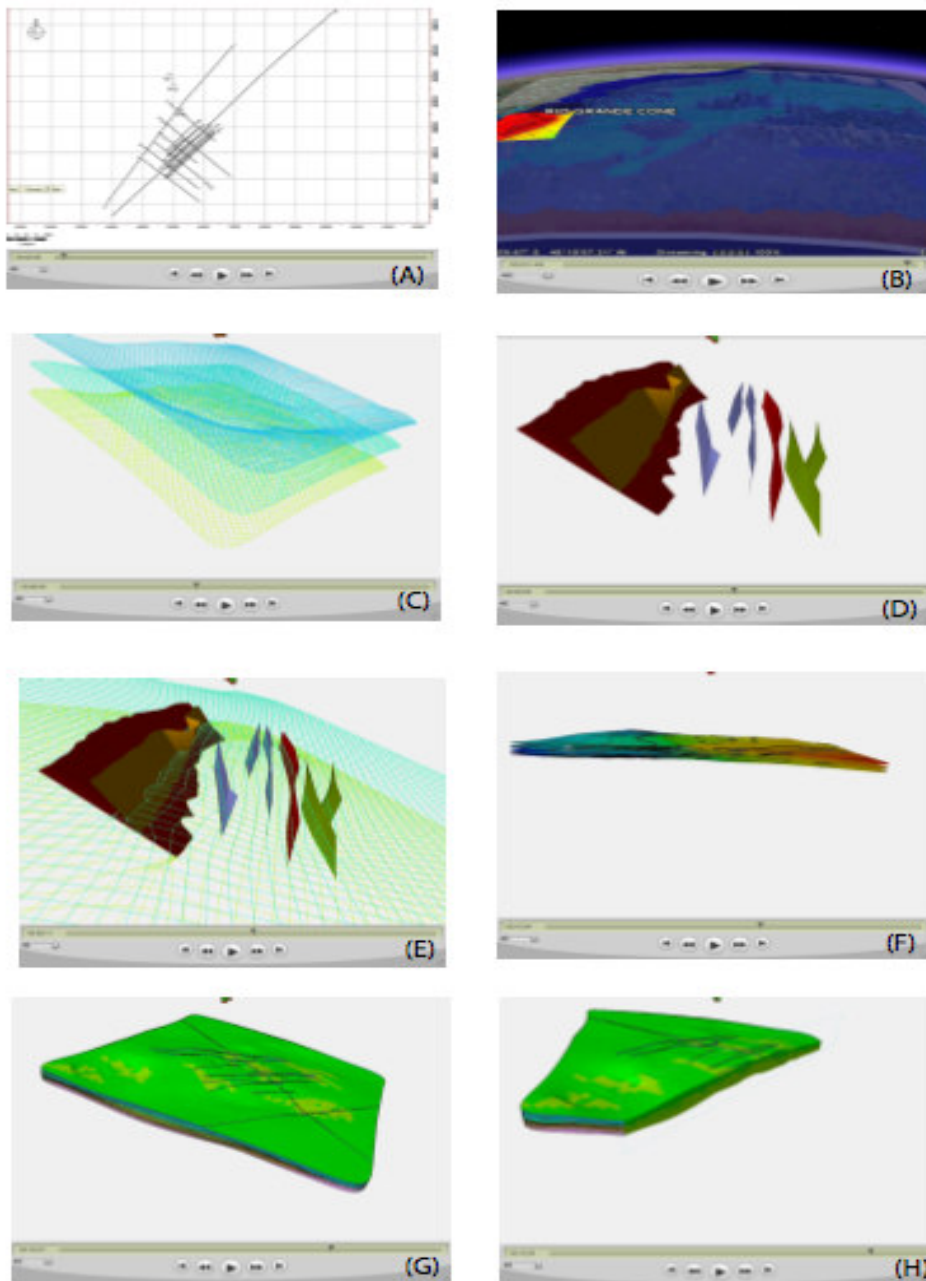


Figura 9. *Snapshot* con las etapas desarrolladas a partir de diferentes secuencias y modelamiento de datos sísmicos y función de velocidades 2.5-D. (A) mapas de líneas sísmicas y (B) localización geográfica, (C) malla de entrada de datos, la cual se constituye el enlace con elementos estructurales (D), siendo incorporados (E) y permiten, insertar horizontes, superficies (F), con elementos geomorfológicos (G) y pueden ser visualizados en forma 3D.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

3.1 APÊNDICE A. Vídeos resultado do modelamento e visualização durante a interpretação sismoestratigráfica.

VIDEO 1. Linhas sísmicas e apresentação da superfície dos BSR

File: Seism_canSBR_vert.avi

VIDEO 2. Modelo Final

File: Final_model.avi

VIDEO 3. Modelo final com a visualização de *slices* no volume.

File: linhas_geomorph05.avi

3.2 Anexo A. Aceite Submissão dos Artigos aos editores.

Artigo I.

From [EditorRBGf<editor@sbgf.org.br>](mailto:editor@sbgf.org.br)

to lacastillol@unal.edu.co

Ref: Artigo submetido à RBGf 387

Prezado Sr. Luis Antonio Castillo Lopez,

Acusamos o recebimento do artigo intitulado "Integración de Reflectores Sismoestratigraficos y Estratigrafia de Secuencias para Modelos dos y Medio Dimensionales 2.5-D" da autoria de Luis Antonio Castillo Lopez, Thais de Souza Kazmierczak e Farid Chemale Jr.

Para controle o trabalho recebeu o número: 387.

Somos gratos por considerarem a RBGf para sua publicação.

Atenciosamente,

Cleverson Guizan Silva

Editor-chefe da RBGf

Artigo II.

Bogotá, January 14th de 2009

Drs :

Castillo., L.L.A.,

Kazmierczak, T de S.,

Chemale., F Jr.

The Chief Editor of Earth Sciences Research Journal (ESRJ), have received the manuscript: "Tectono Seismostratigraphic model of the Rio Grande Cone – Brazil: Seismic sequences." by Castillo., L.L.A, Kazmierczak, T de S., and Chemale., F Jr.

This article will be evaluated for our scientific committee to be accepted for publication.

Sincerely,

Luis A. Montes V.

Editor ESRJ

Departamento de Geociencias

Universidad Nacional de Colombia

Artigo III.


Journal of South American Earth Sciences

[Contact us](#) | [Help ?](#) | [Best EES online training session: February 10th EES Using Classifications](#) | [More information & register](#)

[home](#) | [main menu](#) | [submit paper](#) | [guide for authors](#) | [register](#) | [change details](#) | [log out](#)

Username: lacastillo | Role: Author | Version: 6.0

Submissions Being Processed for Author **luis castillo, M.D.**

Page: 1 of 1 (1 total submissions) Display 10 results per page.

Action	Manuscript Number	Title	Initial Date Submitted	Status Date	Current Status
Action Links		Rio Grande Cone Stratigraphy Sequences, Structural Geology and Seismic Geomorphology.	Feb 11, 2009	Feb 11, 2009	Submitted to Journal

Page: 1 of 1 (1 total submissions) Display 10 results per page.

[<< Author Main Menu](#)

[help](#) | [Privacy Policy](#) | [Terms and Conditions](#)

© 2006 - 2009 Elsevier B.V.

From "Journal of South American Earth Sciences" <kellogg@geol.sc.edu>
To lacastillo@yahoo.com.br

Dear Geophysicists luis castillo,

We have received your article "Rio Grande Cone Stratigraphy Sequences, Structural Geology and Seismic Geomorphology." for consideration for publication in Journal of South American Earth Sciences.

Your manuscript will be given a reference number once an editor has been assigned.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Elsevier Editorial System
Journal of South American Earth Sciences

Artigo IV.

From [Revista Geofisica<revgeofisica.ipgh@gmail.com>](mailto:revgeofisica.ipgh@gmail.com)

To [Luis Antonio Castillo Lopez<lucastillol@unal.edu.co>](mailto:lucastillol@unal.edu.co)

Asunto Re: recibido

Santiago 11 de Febrero del 2009

Señor
Luis Antonio Castillo L
Instituto de Geociencias U F De Rio Grande do Sul

Estimado
Hemos recibido con agrado se contribución "Estratigrafía de Secuencia en un modelo dos y medio dimensional 2.5 D del cono del Rio Grande".
En este momento estamos enviando a los referis correspondientes.
La demora en contestar se debe a que en este tiempo hay vacaciones por estos lados.

Atte.
Manuel Araneda
Editor