



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:**  
**GEOLOGIA MARINHA, COSTEIRA E SEDIMENTAR**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**AVALIAÇÃO DE CONTROLES ESTRUTURAIS NA**  
**EVOLUÇÃO DO DELTA DO RIO SÃO FRANCISCO**  
**UTILIZANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS**

**ALANA ADERNE DOS SANTOS**

SALVADOR

2018

**AVALIAÇÃO DE CONTROLES ESTRUTURAIS NA  
EVOLUÇÃO DO DELTA DO RIO SÃO FRANCISCO  
UTILIZANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS**

**ALANA ADERNE DOS SANTOS**

*Orientador: Prof. Dr. José Maria Landim Dominguez*

*Co-orientadora: Profa. Dra. Alanna Costa Dutra*

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Geologia, Área de Concentração: Geologia Costeira, Marinha e Sedimentar.

SALVADOR

2018

(FICHA CATALOGRÁFICA)

Aderne dos Santos, Alana  
AVALIAÇÃO DE CONTROLES ESTRUTURAIIS NA EVOLUÇÃO DO DELTA DO  
RIO SÃO FRANCISCO UTILIZANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS / Alana Aderne  
dos Santos, José Maria Landim Dominguez, Alanna Costa Dutra. --  
Salvador, 2018.  
59 f. : il

Orientador: José Maria Landim Dominguez.  
Coorientador: Alanna Costa Dutra.  
Dissertação (Mestrado - Pós Graduação em Geologia) --  
Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal da Bahia,  
2018.


1. delta. 2. cânion. 3. São Francisco. 4. sísmico. I. Landim  
Dominguez, José Maria. II. Costa Dutra, Alanna. I. Landim  
Dominguez, José Maria. II. Costa Dutra, Alanna. III. Título.

**ALANA ADERNE DOS SANTOS**

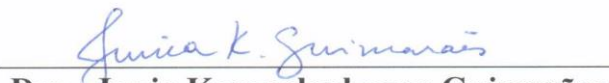
**AVALIAÇÃO DE CONTROLES ESTRUTURAIS NA  
EVOLUÇÃO DO DELTA DO RIO SÃO FRANCISCO  
UTILIZANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Geologia na área de concentração em Geologia Marinha, Costeira e Sedimentar em 26/01/2018.

**DISSERTAÇÃO APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. José Maria Landim Dominguez**  
Orientador – UFBA

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Carlos César Uchôa de Lima**  
Examinador Externo – UEFS

  
\_\_\_\_\_  
**Dra. Junia Kacelenbogen Guimarães**  
Examinadora Externa – UFBA

Salvador – BA  
2018

*À Andréa, minha mãe, com amor.*

## **AGRADECIMENTOS**

A todo Divino Maravilhoso!

À minha mãe Andréa e as minhas irmãs, Clara e Lilian, por todo afeto e apoio emocional, vocês são as mulheres da minha vida.

Ao meu namorado e amigo Cassio, por tornar sempre as coisas mais simples.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Maria Landim Dominguez, por todo conhecimento transmitido e ajuda na realização desse trabalho.

À minha co-orientadora Prof.(a) Dr.(a) Alanna Costa Dutra, pelo conhecimento transmitido, pela amizade e pela sensibilidade no entendimento desse momento.

A velhos e novos amigos, em especial Isaac, Thaís, Clarinha, Marcela, Raiza e Lorena, por estarem sempre por perto.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFBA e todos os seus membros, pela experiência adquirida.

Ao Laboratório de Estudos Costeiros, pela oportunidade e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela bolsa de mestrado concedida.

Aos membros da banca examinadora, pela presença na defesa e avaliação deste trabalho.

À toda equipe do LEC, pela convivência que torna os dias menos difíceis. Em especial a Junia e a Rafael pelas contribuições feitas a esse trabalho.

Sinto-me muito grata!

## RESUMO

O delta do rio São Francisco é uma planície arenosa de idade quaternária construída em um baixo estrutural da bacia de Sergipe-Alagoas (SEAL), conhecido como Baixo do São Francisco. O limite interno do delta do São Francisco é marcado por escarpas retilíneas, que o separam da Formação Barreiras adjacente, e possuem traçado coincidente com importantes falhas do arcabouço estrutural da bacia Sergipe-Alagoas. Assim, a partir do prévio conhecimento de características do delta do São Francisco e de um embasamento teórico que nos aponta a existência de um controle estrutural na formação e evolução dos sistemas deltaicos de uma maneira geral, sugerimos uma influência da estruturação da bacia de Sergipe-Alagoas sobre o delta e tentamos inferi-la utilizando uma metodologia adequada. O presente trabalho consiste na utilização do método geofísico sísmico, integrados com as informações geológicas e geofísicas da área, tendo como objetivo principal a avaliação dos controles estruturais existentes sobre a formação e a evolução do delta do São Francisco e região circunvizinha. A primeira etapa desse trabalho consta de um amplo levantamento bibliográfico e a busca por dados geofísicos pré-existentes na região. A segunda etapa consta da interpretação de um dado sísmico 3D, localizado na plataforma continental, em uma área que abrange o Cânion do São Francisco, que por sua vez estabelece uma relação com o delta aqui em estudo. A interpretação desse dado permitiu a individualização de 5 unidades geológicas, bem como as falhas que as recortam. A análise do dado sísmico permitiu a geração de mapas de isópacas, em profundidade, da região. Foi possível identificar, a partir da análise conjunta de todas as informações geradas e pré-existentes, a presença de um conjunto de falhas que afetam de maneira direta a sedimentação na região. A análise dos dados e o conhecimento prévio da geologia da área nos leva a acreditar que as falhas observadas estariam relacionadas a uma reativação de caráter tectônico da região de estudo.

Palavras-chave: delta; cânion; São Francisco; sísmico.

## **ABSTRACT**

The São Francisco River delta is a Quaternary sandy plain built on a structural low of the Sergipe-Alagoas Basin, known as the São Francisco Low. The inner limit of the São Francisco River delta is defined by rectilinear cliffs between the delta plain and the Barreiras Formation, which coincide with important faults of the Sergipe-Alagoas structural framework. Thus, based on a theoretical background that indicates the existence of structural control over the formation and evolution of delta systems in general, and previous knowledge of this area, it is possible that the Sergipe-Alagoas Basin structure has influenced the delta. This relationship can be inferred using adequate methodology. Seismic geophysical method was integrated in the present study with the geological and geophysical information on the area. The main objective was to evaluate the existing structural controls over the formation and evolution of the São Francisco delta and neighboring areas. The first stage of the present study consisted of a thorough bibliographic review and the search for pre-existing geophysical data in the region. The second stage consisted of the interpretation of a 3D seismic data, located on the continental shelf, in an area that encompasses the São Francisco Canyon, which, in turn, establishes a relationship with the São Francisco delta. The interpretation of this data allowed the individualization of 5 geological units, as well as the faults that cut them. The seismic data analysis yielded isopach maps of the region in relation to depth. The presence of a set of faults that directly affect the sedimentation in the region was identified through the joint analysis of all generated and pre-existing information. The data analysis and a previous knowledge regarding the geology of this area indicate that the faults observed are related to a tectonic reactivation of the study area.

Keywords: delta; canyon; São Francisco; seismic.



# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>9</b>
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	11
3. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS.....	13
4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	13
5. REFERÊNCIAS.....	14
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>17</b>
<b>ARTIGO.....</b>	<b>17</b>
CONFIRMAÇÃO DE SUBMISSÃO DO ARTIGO.....	17
O ARTIGO: AVALIAÇÃO DE CONTROLES ESTRUTURAIIS NA EVOLUÇÃO DO DELTA DO RIO SÃO FRANCISCO UTILIZANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS.....	18
Resumo.....	18
Introdução.....	19
Caracterização Geológica.....	21
Arcabouço Estrutural da Bacia Sergipe-Alagoas (SEAL).....	21
O Delta do São Francisco.....	22
Possíveis Controles Estruturais no desenvolvimento do Delta do São Francisco.....	22
Plataforma Continental e o Cânion do São Francisco.....	23
Materiais e Métodos.....	24
Discussão.....	33
Conclusão.....	35
Referências.....	35
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>41</b>
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>41</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>42</b>
<b>JUSTIFICATIVA CO-AUTORES.....</b>	<b>42</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>43</b>
<b>REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA.....</b>	<b>43</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO GERAL

---

### 1. INTRODUÇÃO

Deltas são definidos como uma protuberância da linha de costa causada pelo aporte de sedimentos fluviais em um ambiente de mais baixa energia, em um contexto onde o suprimento sedimentar é maior do que a capacidade da bacia de distribuí-lo (Bhattacharya, 2003). Ambientes deltaicos possuem uma grande importância, uma vez que essas áreas oferecem condições diversas de sustento para as populações que nelas se estabelecem. Como exemplo são citadas as regiões de terras férteis para a agricultura e a proximidade a cursos fluviais. Nos dias atuais, muitos estudos são realizados em deltas que têm como alvo a indústria de óleo e gás, porém trabalhos preocupados com os aspectos ambientais dessas regiões também vêm sendo desenvolvidos. O aumento significativo dos impactos ambientais causados pelo aumento da população nessas áreas tem gerado uma preocupação crescente com as mesmas, bastante suscetíveis a problemas como erosão costeira, subsidência, enchentes e intrusão salina (Sánchez-Arcilla et al., 1998).

Vários são os fatores apontados como controladores da sedimentação deltaica: o clima, a descarga fluvial, as amplitudes das marés, a energia das ondas, as variações do nível do mar, padrões dos ventos, a deriva litorânea (Bhattacharya e Walker, 1992; Dominguez, 1990, 1996; Dominguez, Bittencourt e Martin, 1983). Outro fator importante na sedimentação deltaica é a tectônica da área, que apesar de pouco abordado como um dos fatores determinantes nesse processo apresenta evidências do seu controle em deltas ao redor do mundo.

Vários trabalhos analisaram a tectônica como o principal agente controlador na formação dos deltas. Goodbred et al (2003), em um trabalho sobre o delta do Ganges-Brahmaputra, ressaltou a influência da tectônica dos Himalaias nas taxas de sedimentação, magnitude e características dos depósitos sedimentares nas margens do delta. Carminati et al (2003) escreveu sobre o Delta do Pó e a influência dos ciclos glaciais e dos processos tectônicos na subsidência natural desse delta.

Armstrong et al (2014) desenvolveu um estudo que apresenta a influência da presença de falhas de crescimento reativadas no delta do Mississippi e Stanley (1988) desenvolveu um estudo que tentou entender os processos de subsidência ocorridos no Delta do Nilo, concluindo que as taxas de subsidência eram aceleradas devido à neotectônica presente na região. Por fim, Lima et al (2014) realizou um estudo no delta do São Francisco que teve como foco o estudo da reativação de falhas no Quaternário como o principal agente controlador da deposição de sedimentos e da morfologia desse delta.

O delta do rio São Francisco (DSF) é uma planície arenosa de idade quaternária (Figura 1) construída em um baixo estrutural da bacia de Sergipe-Alagoas, conhecido como Baixo do São Francisco (Souza-Lima, 2006). O conhecimento sobre o DSF se restringe basicamente a sua porção superficial aflorante. Guimarães (2010) foi a primeira a fornecer informações de subsuperfície da área, o que possibilitou avançar no conhecimento da arquitetura deposicional deste sistema. Uma análise preliminar dos trabalhos já publicados e dados existentes sugerem algum tipo de controle tectônico no desenvolvimento do DSF.

Ponte (1969) realizou um estudo morfo-estrutural da bacia Sergipe-Alagoas baseado na possibilidade de que a região onde se depositou o DSF sofreu movimentações tectônicas durante o Quaternário. Anomalias encontradas no padrão de drenagem, em um rio do porte do São Francisco, reforçaram a ideia de um forte controle estrutural dos altos da bacia sobre o curso do rio, forçando-o a contorná-los.

O autor também identificou evidências da reativação de falhas que afetaram a Formação Barreiras, próxima ao delta. Com base na observação do mapa estrutural sísmico do embasamento da região, foi possível notar que a planície deltaica tem o seu limite interior representado por encostas abruptas e retilíneas da Formação Barreiras e que essas acompanham alinhamentos estruturais representados por falhas reativadas datadas do Quaternário.

A partir do pressuposto teórico que aponta para a existência de um controle estrutural na formação e evolução dos sistemas deltaicos de uma maneira geral e do prévio conhecimento de

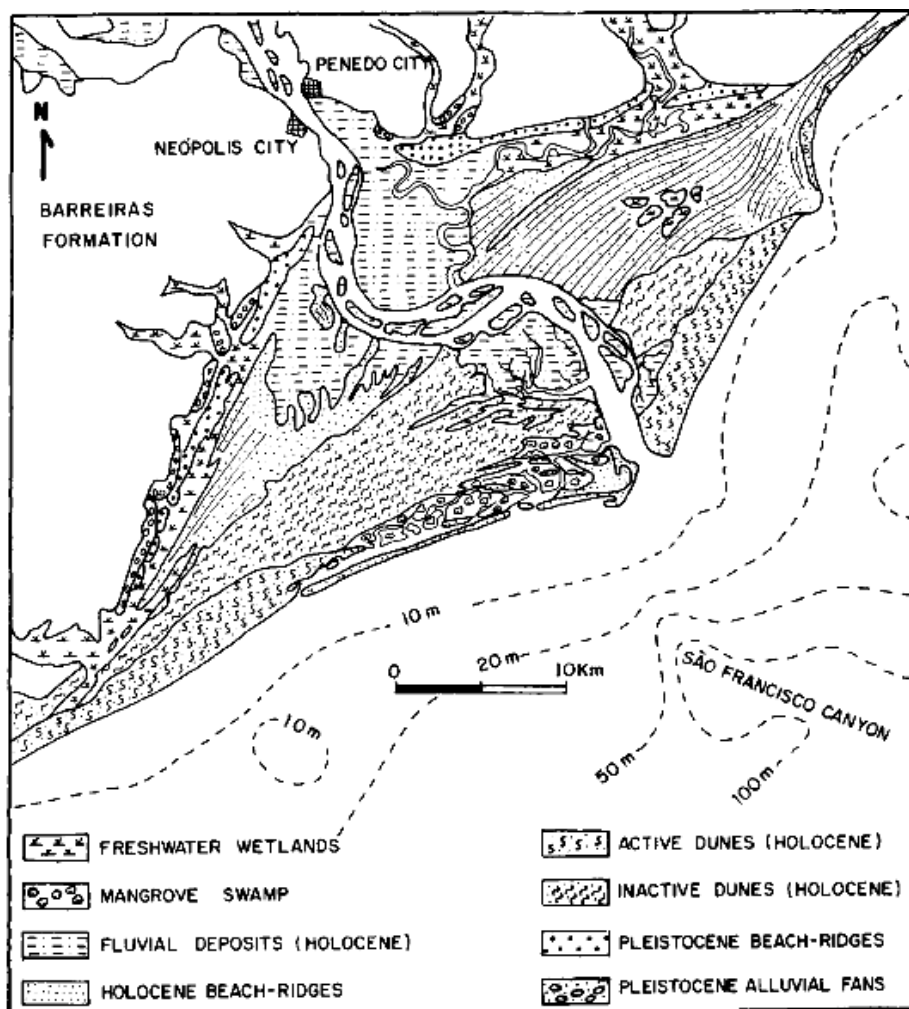


Figura 1: Mapa geológico da planície deltaica do rio São Francisco (Fonte: Dominguez, 1996).

características do DSF, a exemplo de que na plataforma continental a clinofórma deltaica se desenvolveu em um baixo topográfico limitado por escarpas retilíneas com orientação compatível com o arcabouço estrutural da bacia Sergipe-Alagoas, podemos sugerir uma possível influência da estruturação da bacia sobre o desenvolvimento deste delta.

O presente trabalho consiste na utilização do método sísmico, integrado aos dados pretéritos de caráter geológico e geofísico da área de estudo, tendo como objetivo principal a avaliação dos controles estruturais na formação e evolução do DSF.

## 2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O foco desse estudo é o DSF, que por sua vez, se insere no contexto regional da bacia SE-AL. Como dito anteriormente, o mesmo foi construído em um baixo estrutural dessa bacia, o Baixo do São Francisco (Souza-Lima, 2006).

A Bacia de SE-AL, localizada nos estados de Sergipe e Alagoas, distribui-se tanto em terra quanto em região submersa, estendendo-se em direção ao mar além da isóbata de 2.000 m, em uma área total de aproximadamente 34.600 km<sup>2</sup>, sendo 12.000 km<sup>2</sup> na porção emersa. Esta bacia é limitada pelos paralelos 9°S e 11°30'S e pelos meridianos 34°30'W e 37°30'W (Guimarães, 2010).

De maneira mais específica, a área de estudo (Figura 2) corresponde não só à planície deltaica do São Francisco, como também à parte da cabeceira do cânion homônimo onde se localiza o dado sísmico 3D.

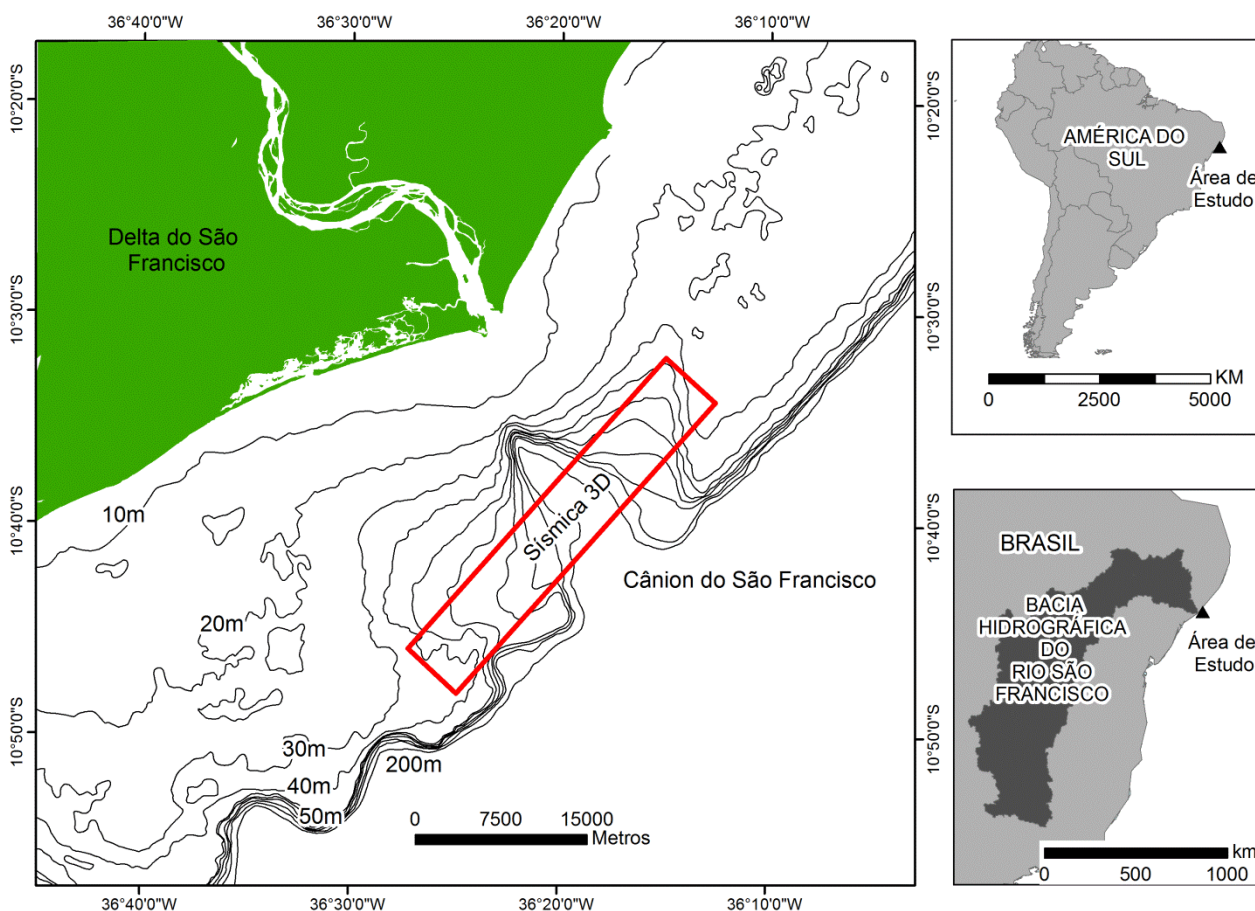


Figura 2: Mapa de localização da área de estudo, compreendendo a região do delta do São Francisco, cânion do São Francisco e batimetria da área. O DSF está localizado entre os limites dos Estados de Sergipe e Alagoas, ambos pertencentes à região Nordeste do Brasil.

### **3. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS**

Diversos autores (Bhattacharya e Giosan, 2003; Bittencourt et al., 2007; Dominguez, 1999; Guimarães, 2010) investigaram os processos na evolução da planície deltaica do rio São Francisco (fluviais, deriva litorânea, variação do nível relativo do mar e refração das ondas). Contudo, foi Guimarães (2010) que primeiro forneceu informações referentes aos dados de subsuperfície neste delta, utilizando sondagens do tipo SPT (Standard Penetration Test), seguida de Rangel (2017) que investigou a porção submersa da plataforma continental adjacente ao delta utilizando sísmica rasa de alta resolução.

Assim, as informações referentes aos dados de subsuperfície na planície deltaica do rio São Francisco ainda são muito limitadas. Com o intuito de trazer uma nova abordagem para os estudos evolutivos da área, técnicas geofísicas serão utilizadas para investigar os possíveis controles estruturais atuantes durante a evolução do DSF.

Esse estudo possui como objetivo principal a integração do método geofísico sísmico 3D com modelos e informações geológicas e geofísicas da área, disponíveis na literatura, na tentativa de entender a possível atuação de um controle estrutural exercido sobre a bacia SE-AL na formação e evolução do delta.

### **4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação subdivide-se em três capítulos:

Capítulo 1 – Introdução Geral sobre o trabalho com uma breve revisão teórica, localização da área de estudo, contextualização do problema e objetivos principais;

Capítulo 2 – Apresentação do artigo, intitulado “Avaliação de Controles Estruturais na Evolução do Delta do Rio São Francisco Utilizando Métodos Geofísicos”, a ser submetido.

Capítulo 3 – Apresentação das principais conclusões do trabalho.

## 5. REFERÊNCIAS

ARMSTRONG C., MOHRIG D., HESS T., GEORGE T., STRAUB K. M., 2014, Influence of growth faults on coastal fluvial systems: Examples from the late Miocene to Recent Mississippi River Delta, *Sedimentary Geology* 301 (2014) 120–132.

BITTENCOURT, A.C.S.P.; DOMINGUEZ, J.M.L.; MARTIN, L.; FERREIRA, Y.A., 1982. Dados preliminares sobre a evolução do delta do São Francisco (SE/AL) durante o Quaternário, influência das variações do nível do mar. Atas do IV Simpósio do Quaternário no Brasil, p. 49-62.

BITTENCOURT, A.C.S.P.; DOMINGUEZ, J.M.L.; FONTES, L.C.S.; SOUSA, D.L.; SILVA, I.R.; SILVA, F.R. Wave refraction, river damming, and episodes of severe shoreline erosion: the São Francisco river mouth, northeastern Brazil. *Journal of Coastal Research*. 23 (4). 2007. p. 930-938.

BHATTACHARYA, J.P.; GIOSAN, L. Wave-influenced deltas: geomorphological implications for facies reconstruction. *Sedimentology*. 50. 2003. p.187-210.

BHATTACHARYA, J. P.; WALKER, R. G. Deltas. In: WALKER, R. G.; JAMES, N. P. (eds.): *Facies Models - Response to sea level change*. Toronto. Geological Association of Canada. 1992. p. 157-178

CARMINATI, E., MARTINELLI, G., and SEVERI, P., 2003, Influence of glacial cycles and tectonics on natural subsidence in the Po Plain (Northern Italy): Insights from 14C ages: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 4, p. 1082.

DOMINGUEZ, J.M.L. Delta dominados por ondas: críticas às idéias atuais com referência particular ao modelo de Coleman & Wright. *Revista Brasileira de Geociências*, 20 (1-4). 1990. p. 352-361.

DOMINGUEZ, J.M.L., 1996. The São Francisco strandplain: a paradigm for wave-dominated deltas. Geological Society Special Publication 117: 217-231.

DOMINGUEZ, J.M.L. Erosão Costeira na Região Leste-Nordeste do Brasil. Bahia, Brazil. Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Full Professor thesis. 1999. 175p.

DOMINGUEZ, J.M.L.; BITTENCOURT, A.C.S.P; MARTIN, L. O papel da deriva litorânea de sedimentos arenosos na construção das planícies costeiras associadas às desembocaduras dos rios São Francisco (SE-AL), Jequitinhonha (BA), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). Revista Brasileira de Geociências. 13(2). 1983. p. 98-105.

GOODBRED, S.L., Jr., KUEHL, S.A., STECKLER, M.S., and SARKER, M.H., 2003, Controls on facies distribution and stratigraphic preservation in the Ganges-Brahmaputra delta sequence: Sedimentary Geology, v. 155, p. 301–316.

GUIMARÃES, J.K. Evolução do delta do rio São Francisco – estratigrafia do Quaternário e relações morfodinâmicas. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências. Orientador: José Maria Landim Dominguez. 2010. 127p.

LIMA, C.U., BEZERRA, H.R., NOGUEIRA, C. C., RUBSON, P., SOUZA, O.L., 2014, Quaternary fault control on the coastal sedimentation and morphology of the São Francisco coastal plain, Brazil. Tectonophysics , 633, 98-114.

PONTE, F.C. (1969), Estudo Morfo-Estrutural da Bacia Alagoas-Sergipe – Bol. Tec. Petrobras 12 (4): 439,474.

RANGEL, A.G.A.N. Sedimentação e Arquitetura Depositional do Delta do São Francisco Utilizando Sísmica Rasa de Alta Resolução. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências. Orientador: José Maria Landim Dominguez. 2017. 48p.



SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; JIMENÉZ, J.A.; VALDEMORO, H.I., 1998. The Ebro delta: morphodynamics and vulnerability. *Journal of Coastal Research* 14 (3): 754–772


SOUZA-LIMA, W. Litoestratigrafia e evolução tectono-sedimentar da bacia de Sergipe-Alagoas, introdução. Fundação Paleontológica Phoenix. Aracaju. Ano 8. n. 89. 2006.

STANLEY D.J., 1988, Subsidence in the northeastern Nile delta: Rapid rates, possible causes, and consequences: *Science*, v. 240, p. 497–500.

## CAPÍTULO 2

### ARTIGO

#### CONFIRMAÇÃO DE SUBMISSÃO DO ARTIGO

<b>#144564 Sinopse</b>	
RESUMO   AVALIAÇÃO   EDIÇÃO	
<b>Submissão</b>	
Autores	Alana Aderne dos Santos, José Maria Landim Dominguez, Alanna Costa Dutra
Título	Avaliação de controles estruturais na evolução do delta do rio são francisco utilizando métodos geofísicos
Documento original	<a href="#">144564-287624-1-SM.DOCX</a> 2018-03-20
Docs. sup.	Nenhum(a) <a href="#">INCLUIR DOCUMENTO SUPLEMENTAR</a>
Submetido por	Srta Alana Aderne dos Santos 
Data de submissão	March 20, 2018 - 05:44 PM
Seção	Artigos
Editor	Nenhum(a) designado(a)
<hr/>	
<b>Situação</b>	
Situação	Aguardando designação
Iniciado	2018-03-20
Última alteração	2018-03-20

Srta Alana Aderne dos Santos,

Agradecemos a submissão do trabalho "Avaliação de controles estruturais na evolução do delta do rio são francisco utilizando métodos geofísicos" para a revista Geologia USP. Série Científica. Acompanhe o progresso da sua submissão por meio da interface de administração do sistema, disponível em:

URL da submissão:

<http://www.revistas.usp.br/guspssc/author/submission/144564>

Login: [alanaaderne](#)

Em caso de dúvidas, entre em contato via e-mail.

Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de compartilhar seu trabalho.

## **O ARTIGO: AVALIAÇÃO DE CONTROLES ESTRUTURAIS NA EVOLUÇÃO DO DELTA DO RIO SÃO FRANCISCO UTILIZANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS**

*Santos, A.A., Dominguez, J.M.L, Dutra, A.C.*

### **Resumo**

O delta do rio São Francisco é uma planície arenosa de idade quaternária construída em um baixo estrutural da bacia de Sergipe-Alagoas (SEAL), conhecido como Baixo do São Francisco. O limite interno do delta do São Francisco é marcado por escarpas retilíneas, que o separam da Formação Barreiras adjacente, e possuem traçado coincidente com importantes falhas do arcabouço estrutural da bacia Sergipe-Alagoas. A partir de um embasamento teórico que nos aponta a existência de um controle estrutural na formação e evolução dos sistemas deltaicos de uma maneira geral, sugerimos uma influência da estruturação da bacia de Sergipe-Alagoas sobre o delta e tentamos inferi-la utilizando uma metodologia adequada. O presente trabalho consiste na utilização do método geofísico sísmico, integrados com as informações geológicas da área, tendo como objetivo principal a avaliação dos controles estruturais existentes sobre a formação e a evolução do delta do São Francisco. A interpretação do dado sísmico 3D permitiu a individualização de 5 unidades geológicas, bem como as falhas que as recortam. A análise do dado sísmico permitiu a geração de mapas de isópacas, em profundidade, da região. Foi possível identificar, a partir da análise conjunta de todas as informações geradas e pré-existentes, a presença de um conjunto de falhas que afetam de maneira direta a sedimentação na região. A análise dos dados e o conhecimento prévio da geologia da área nos leva a acreditar que as falhas observadas estariam relacionadas a uma reativação de caráter tectônico da região de estudo.

Palavras-chave: delta; cânion; São Francisco; sísmico.

## Introdução

Deltas são definidos como uma protuberância da linha de costa causada pela inserção de um sistema fluvial em um ambiente de mais baixa energia, em um contexto onde o suprimento sedimentar é maior do que a capacidade dos agentes da bacia receptora (ondas, correntes, marés) de redistribuí-los (Bhattacharya, 2003). Ambientes deltaicos possuem uma grande importância, uma vez que essas áreas oferecem uma variedade de recursos naturais para as populações que nelas se estabelecem, incluindo terras férteis para a agricultura e a proximidade de cursos fluviais.

Nos dias atuais, além dos estudos realizados em deltas voltados para a indústria de óleo e gás, surgiram vários trabalhos preocupados com os aspectos ambientais e o impacto das mudanças climáticas nestas regiões. O aumento significativo dos impactos ambientais causados pelo aumento da população nessas áreas tem gerado uma preocupação crescente com as mesmas, bastante suscetíveis a problemas como erosão costeira, subsidência, enchentes e intrusão salina (Sánchez-Arcilla et al., 1998).

Vários são os fatores apontados como controladores da sedimentação deltaica: clima, magnitude da descarga fluvial, altura das marés, energia e frequência direcional das ondas, variações do nível relativo do mar, padrões dos ventos etc. (Bhattacharya e Walker, 1992; Dominguez, 1990, 1996; Domingue et al., 1983). Outro fator importante na sedimentação deltaica é a tectônica da área, que apesar de pouco mencionada nos estudos em deltas holocênicos, pode exercer efetivamente um controle importante no desenvolvimento destas feições.

Trabalhos relativamente recentes que analisam o papel da tectônica como o principal agente controlador na formação dos deltas incluem: Goodbred et al. (2003), sobre o delta do Ganges-Brahmaputra, Carminati et al. (2003) sobre o delta do Po, Armstrong et al (2014) sobre o delta do Mississippi e Stanley (1988) sobre o delta do Nilo.

O delta do rio São Francisco (DSF) é uma planície arenosa de idade quaternária construída em um baixo estrutural da bacia de Sergipe-Alagoas, conhecido como Baixo do São Francisco (Souza-Lima, 2006). O conhecimento sobre o DSF se restringe basicamente à sua porção superficial aflorante. Guimarães (2010) foi a primeira a fornecer informações de subsuperfície da área. Rangel (2017) investigou a porção submersa da plataforma continental adjacente ao delta utilizando sísmica rasa de alta resolução.

Ponte (1969) realizou um estudo morfo-estrutural da porção superficial da bacia de Sergipe-Alagoas, sobre a qual se encontra o delta, e concluiu pela existência de movimentações tectônicas durante o Quaternário. Mais recentemente, Lima et al. (2014) desenvolveu um estudo no Delta do São Francisco, com foco no papel da neotectônica na construção do delta, concluindo pela existência de um controle tectônico na sedimentação.

O presente trabalho avalia a existência de controles estruturais no desenvolvimento do delta do rio São Francisco. Para tal serão utilizados registros de um levantamento sísmico industrial 3D (Figura 1), integrados às demais informações disponíveis sobre a geologia e tectônica da região.

A área de estudo está inserida na bacia sedimentar Sergipe-Alagoas e compreende a planície deltaica e parte da região submersa do DSF, além de parte da região onde se localiza a cabeceira do cânion moderno do São Francisco (Figura 1).

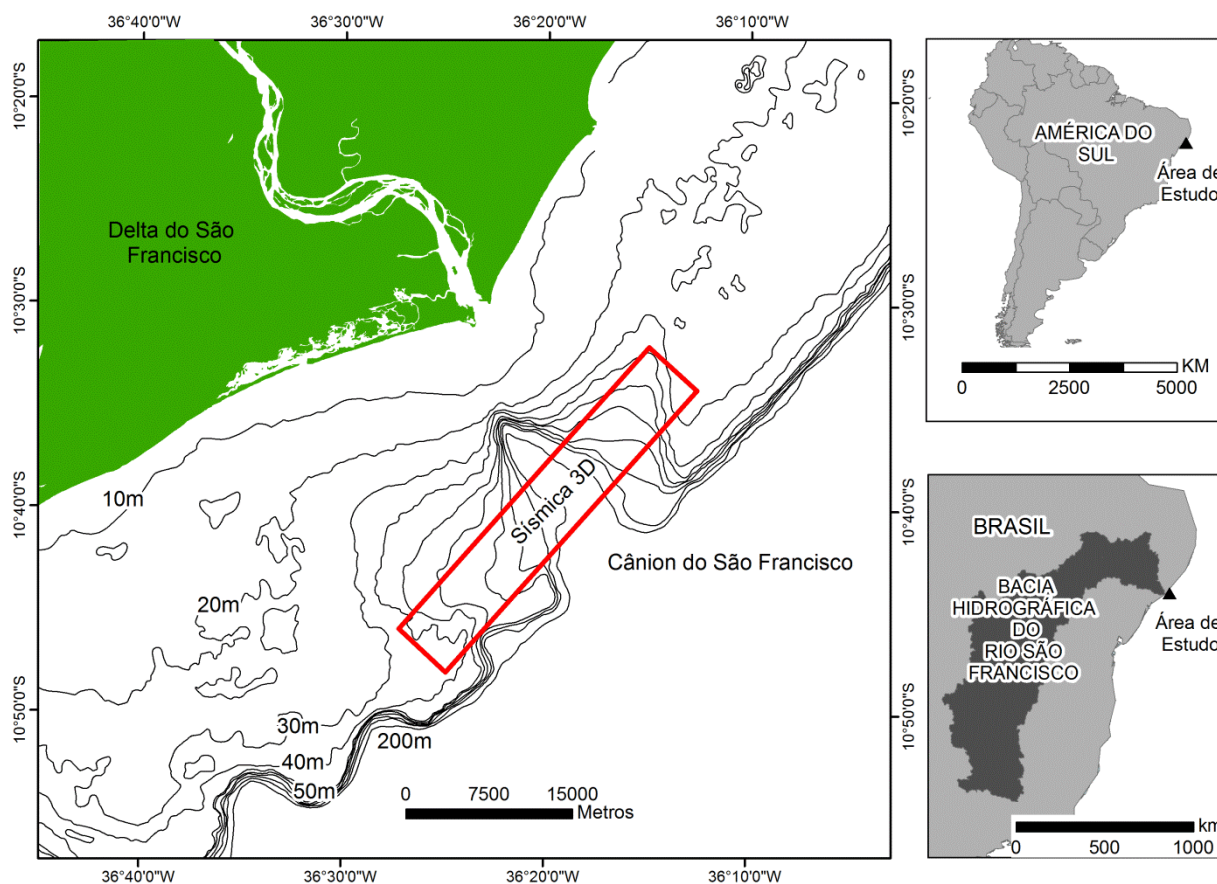


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo, compreendendo a região do delta do São Francisco, cânion do São Francisco e batimetria da área. O DSF está localizado entre os limites dos Estados de Sergipe e Alagoas, ambos pertencentes à região Nordeste do Brasil.

## Caracterização geológica

### *Arcabouço estrutural da bacia Sergipe-Alagoas (SEAL)*

A bacia sedimentar de Sergipe-Alagoas é formada por um rifte assimétrico, alongado na direção NNE/SSW abrangendo cerca de 35.000 km<sup>2</sup> (2/3 na sua porção marítima). Limita-se a norte com a bacia sedimentar de Pernambuco-Paraíba, pelo Alto de Maragogi, e ao sul com a bacia sedimentar do Jacuípe, pela Plataforma de Estância. As sub-bacias de Alagoas e Sergipe estão separadas pelo alto de Japoatã-Penedo (Aquino e Lana, 1990). Sua formação data da abertura do Atlântico Sul e dentre as bacias da margem leste brasileira é a que apresenta a sucessão estratigráfica mais completa, incluindo as megassequências sedimentares pré-rifte, sin-rifte, transicional e margem continental passiva (Cainelli e Mohriak, 1998, 1999b).

O embasamento cristalino, que aflora a oeste da bacia, possui dois domínios geotectônicos distintos: A Faixa Sergipana, na sub-bacia de Sergipe e o Terreno Pernambuco-Alagoas, na sub-bacia de Alagoas, ambos pertencentes ao domínio meridional da Província Borborema (Lana, 1985) e datados do Neoproterozóico e Mesoproterozóico, respectivamente.

O arcabouço estrutural da bacia SEAL é constituído principalmente por falhas e estruturas em meio-gráben. Esse é definido por falhas de direções NE-SW, N-S, E-W e até mesmo NW-SE, todas implantadas durante a fase de rifteamento da bacia. As mesmas são consideradas como falhas normais ou de componente predominantemente normal (Falkenhein et al. 1986). As falhas de direção NE-SW são as predominantes (Souza-Lima, 2006). As falhas de direção N-S são consideradas de grande rejeito (Ojeda e Fugita, 1974), e, juntamente com as de direção E-W correspondem às direções dos esforços distensivos ocorridos durante a formação da bacia (Souza-Lima, 2006). Já as de direção NW-SE deslocam algumas falhas NE-SW, o que sugere que as mesmas se desenvolveram de maneira simultânea ou tardia com relação às demais (Ojeda e Fugita, 1974).

Os compartimentos estruturais presentes no arcabouço tectônico da Bacia de Sergipe-Alagoas são separados por feições na forma de degraus, constituindo grábens ou semi-grábens (Souza-Lima, 2006). Dentre os principais depocentros da bacia, destacamos o Baixo do São Francisco, que se estende para N-NE a partir do Alto de Aracaju e que experimentou várias fases de subsidência ativa. Na região do Baixo do São Francisco está localizado o delta homônimo formado na desembocadura do Rio São Francisco.

### *O delta do São Francisco*

O delta do rio São Francisco é classificado como um delta dominado por ondas (Coleman e Wright, 1975; Galloway, 1975; Bhattacharya e Giosan, 2003; Bhattacharya, 2006). A presença de cordões litorâneos em grande parte da sua planície deltaica testemunha a influência da ação de ondas. Segundo Bhattacharya e Giosan (2003) o delta é considerado assimétrico, devido à deposição de sedimentos marinhos a barlamar da desembocadura e sedimentos fluviais a sotamar.

A planície deltaica está encaixada em um embaçamento esculpido nos depósitos terciários pertencentes à Formação Barreiras e seus limites com a mesma se dá através de falésias inativas com geometria retilínea.

A planície deltaica associada à desembocadura do rio São Francisco é formada por sedimentos quaternários que incluem depósitos de areias litorâneas regressivas de idade pleistocênica e holocênica, depósitos lagunares ou de terras úmidas, de mangue, fluviais e eólicos (Barbosa e Dominguez, 2004; Bitterncourt et al., 2007; Guimarães, 2010; Silva, 2008).

### **Possíveis controles estruturais no desenvolvimento do delta do São Francisco**

Trabalhos anteriores já publicados sobre o Delta do São Francisco (DSF) sugerem algum tipo de controle tectônico no desenvolvimento desse delta. Ponte (1969) concluiu que anomalias no padrão de drenagem atual da região indicam que altos estruturais da bacia de Sergipe-Alagoas obrigaram o rio São Francisco a contorná-los.

O autor também apontou evidências da reativação de falhas que afetaram a Formação Barreiras, próximo ao delta. Com base no mapa estrutural sísmico do embasamento da região, Ponte (1969) chamou atenção que a planície deltaica tem o seu limite interno marcado por encostas abruptas e retilíneas da Formação Barreiras e que essas acompanham alinhamentos estruturais representados por falhas reativadas datadas do Quaternário.

Em um trabalho mais recente, Lima et al. (2014) realizaram um estudo no DSF que teve como foco principal o processo de reativação de falhas no Quaternário, considerado pelos autores como o principal agente controlador da deposição de sedimentos e da morfologia do delta. Este controle se daria a partir da geração de espaço adicional para acomodação de sedimentos.

Segundo aqueles autores pelo menos duas falhas principais, coincidentes com as falésias inativas que delimitam internamente a planície deltaica foram reativadas durante o Mioceno e mais uma vez durante o Pleistoceno Tardio, processo evidenciado pela variação na espessura da Formação Barreiras, ao cruzar essas falhas, sugerindo uma deposição de sedimentos contemporânea ao processo de falhamento.

Além dos estudos apontados acima, podemos citar como possíveis indícios da atuação de um controle estrutural na formação do DSF a presença, na plataforma continental, de um baixo topográfico limitado por escarpas retilíneas com orientação compatível com o arcabouço estrutural da bacia SE-AL, onde a clinofoma deltaica se desenvolveu.

### **Plataforma continental e o cânion do São Francisco**

A plataforma continental de SE-AL é estreita, apresentando largura máxima de 42 km em frente a Maceió e mínima de 18 km na região sul de Sergipe (Coutinho, 1976), e rasa, apresentando profundidades que não ultrapassam 50 m (Cainelli, 1994). Segundo Milliman e Summerhayes (1975), as pequenas dimensões da Plataforma Continental brasileira estão associadas à baixa taxa de sedimentação terrígena, o que favorece o expressivo desenvolvimento de uma sedimentação carbonática.

Dentre as várias feições morfológicas existentes na margem continental SE-AL, os cânions submarinos são as mais proeminentes. Apenas dois deles, o de Japarutuba e o do São Francisco estão associados a cursos fluviais e vales incisos (Fontes, 2017). Segundo Cainelli (1992) estes dois cânions podem ser classificados como modernos e maduros, pois ainda não foram preenchidos e por indentarem a plataforma continental.

O cânion do São Francisco indenta cerca de 18km a plataforma continental e apresenta um desnível máximo, da sua borda para o talvegue, de 850 m e uma largura variável de 2 km na cabeceira do cânion para até cerca de 10 km na região da quebra da plataforma-talude (Fontes, 2017).

A presença do Rio São Francisco na região favorece a revitalização da erosão do cânion, facilitando a sua indentação na plataforma. Cainelli (1992) identificou a existência de um paleocânion na região, lateralmente mais extenso, e coincidente com a cabeceira do cânion atual



que seria o percussor do CSF moderno. Este paleo-cânion teria idade Pós-Miocênica enquanto o CSF moderno teria uma idade do Plioceno/Pleistoceno (Cainelli, 1992).

Em função da proximidade da foz (8 km) e da elevada vazão natural histórica do rio São Francisco, o CSF moderno teria sua origem de algum modo relacionada ao próprio desenvolvimento do delta. Atualmente os sedimentos arenosos da região se encontram retidos na planície deltaica do São Francisco, que é separada da cabeceira do cânion por uma clinofórmula lamosa, a qual, por sua vez, já começa a soterrar a cabeceira do mesmo (Ribeiro, 2016). Esta proximidade sugere que o rio São Francisco influenciou o desenvolvimento do cânion, e que a presença do mesmo também exerceu um papel na evolução do delta.

## **Materiais e métodos**

Este trabalho consistiu da compilação de dados disponíveis na literatura sobre a geologia, arcabouço estrutural da bacia de Sergipe-Alagoas, batimetria da área submersa, e dados geofísicos. Estes dados foram complementados pela análise de dados de sísmica industrial 3D.

Os dados de sísmica industrial 3D (Figura 1) utilizados pertencem ao projeto 0253\_BAIIXO\_SAO\_FRANCISCO\_03 e foi obtido através de concessão para estudos acadêmicos pela ANP (Agência Nacional de Petróleo). Estes dados sísmicos recobrem uma área de 234km<sup>2</sup>, 186 “inlines” separadas de aproximadamente 37m e 1367 “crosslines” separadas de aproximadamente 25m. Os dados foram fornecidos já processados. Das 186 “inlines” disponíveis, foram escolhidas 14, espaçadas regularmente de 373,5m, recobrando todo o polígono sísmico (Figura 2). Estas “inlines” foram interpretadas segundo os princípios da sismoestratigrafia, e gerados os mapas de isópacas das principais unidades mapeadas. Também foram escolhidas para auxiliar na interpretação 3 “crosslines”, de maneira a cobrir trechos representativos do polígono sísmico (Figura 2). Para a conversão TempoxProfundidade foram testados modelos que levavam em consideração uma média da velocidade da onda no fundo marinho ( $\approx 1500\text{m/s}$ ), nos sedimentos Quaternários ( $\approx 1900\text{m/s}$ ) e nos sedimentos da bacia ( $\approx 2300\text{m/s} - 2800\text{m/s}$ ). A velocidade que mais se adequou para realizar a conversão foi a de 2000m/s.

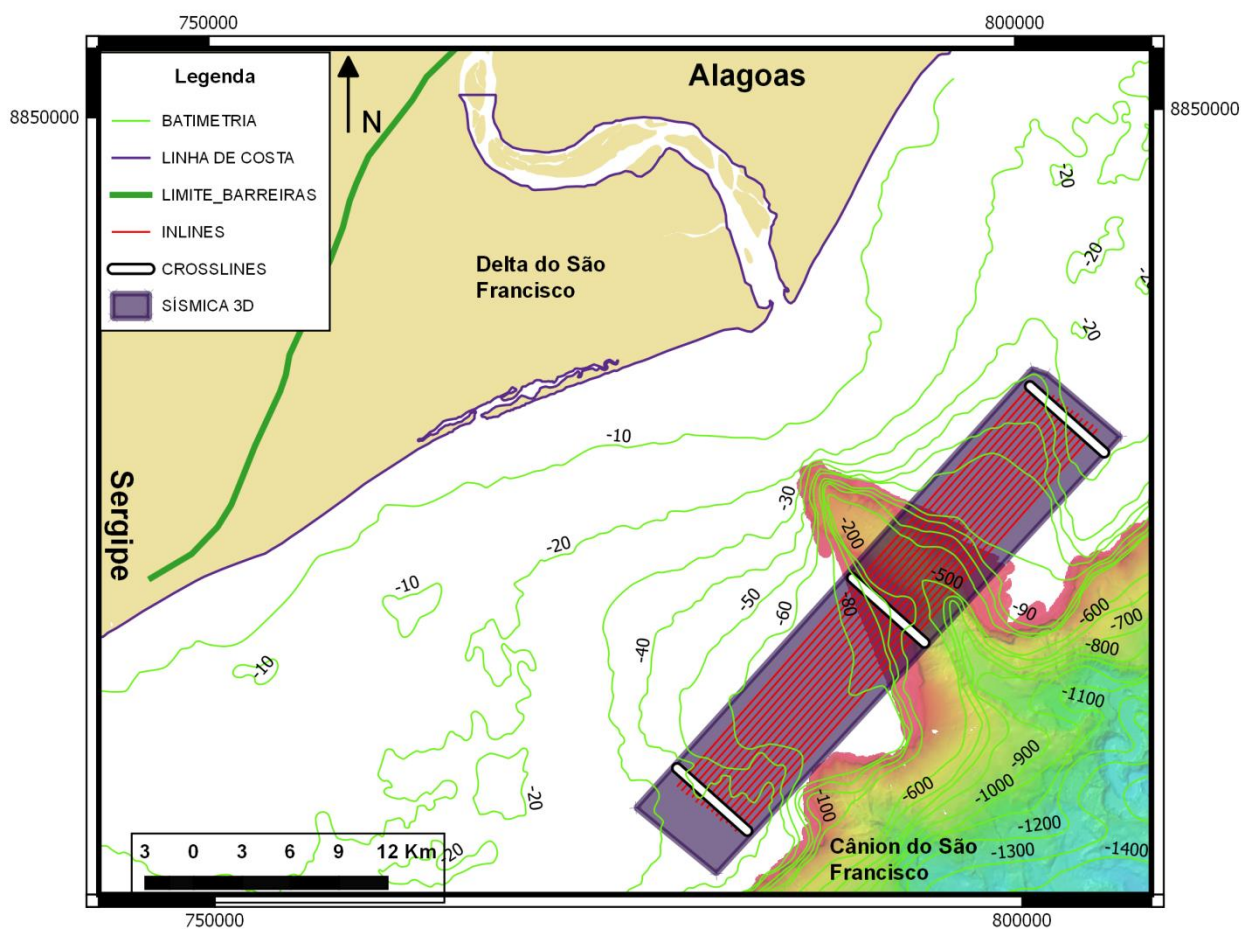


Figura 2: Mapa com a localização das “inlines” e “crosslines” selecionadas para interpretação nesse trabalho.

## Resultados

A interpretação estendeu-se apenas até uma profundidade máxima de aproximadamente 1000 m, porque o nosso interesse está restrito aos eventos mais recentes. Também de acordo com Cainelli (1992) a discordância que marca a passagem Eoceno-Oligoceno situa-se aproximadamente entre 0,5 e 1,0 seg de profundidade. Cinco unidades estratigráficas foram individualizadas (Figuras 3, 4, 5, 6 e 7) e são descritas a seguir:

A Unidade 1 é a unidade basal mais antiga. A configuração interna dos seus refletores é do tipo Paralela/Regular (Ribeiro, 2000) o que indica uma sedimentação uniforme sobre toda a área. A geometria dos refletores (Mitchum Jr. et al., 1977<sup>a</sup>) é do tipo lençol (*sheet*), característica de ambientes plataformais. Sua espessura varia entre 130 e 326m. As maiores espessuras são verificadas na região à nordeste do CSF, diminuindo no sentido da cabeceira do cânion. Na

porção sudoeste, as espessuras se mantêm uniformes na metade mais proximal da linha de costa. Na porção mais distal ocorre um aumento rápido das espessuras, o que associada à geometria interna dos refletores nesta unidade é sugestiva da existência de construções recifais próximas à quebra da plataforma, como já apontado por Cainelli (1992). Esta unidade também se acumulou uniformemente ao longo do eixo do que seria um estágio incipiente da implantação do CSF, onde apresenta a menor espessura. No mapa de isópacas da Unidade 1 (Figura 8), não é possível observar evidências da atuação de falhamentos contemporâneos à sedimentação.

A Unidade 2, sobreposta à Unidade 1, é separada desta última por um refletor bem marcado com elevada continuidade lateral, de alta amplitude. Assim como a Unidade 1 apresenta refletores do tipo Paralelo/Regular com geometria também em lençol. Sua espessura varia entre 125 e 268m. A amplitude dos refletores internos é, entretanto menor que aquela verificada na Unidade 1. Esta unidade representaria portanto uma acumulação típica de ambiente plataformal (Sangree e Windmier, 1977). As espessuras diminuem no sentido da cabeceira do CSF. No mapa de isópacas da Unidade 2 (Figura 9), não é possível observar evidências da atuação de falhamentos contemporâneos à sedimentação.

A Unidade 3 apresenta características bastante diferentes das anteriores. A configuração interna dos seus refletores é do tipo Progradante Complexa Sigmoidal Oblíqua (Ribeiro, 2000), que se caracteriza pela superposição de estratos laterais constituindo superfícies denominadas clinofomas. Sua espessura varia entre 12,5 e 238m. Sua distribuição espacial e a geometria dos refletores indicam uma progradação oblíqua no sentido do continente a partir da porção externa da plataforma. As maiores espessuras são verificadas externamente à depressão batimétrica que ocupa a porção central da plataforma, onde atualmente predomina uma sedimentação carbonática. Os limites das camadas de “bottomset” desta unidade, situadas no entorno da cabeceira do CSF são bruscos e lineares e delimitam a depressão batimétrica mencionada acima. No mapa de isópacas da Unidade 3 (Figura 10) observa-se uma diminuição da espessura no sentido das bordas do CSF. Também é possível verificar mudanças bruscas na espessura dos sedimentos nas extremidades laterais que podem estar associadas à falhamentos síncronos a deposição da mesma.

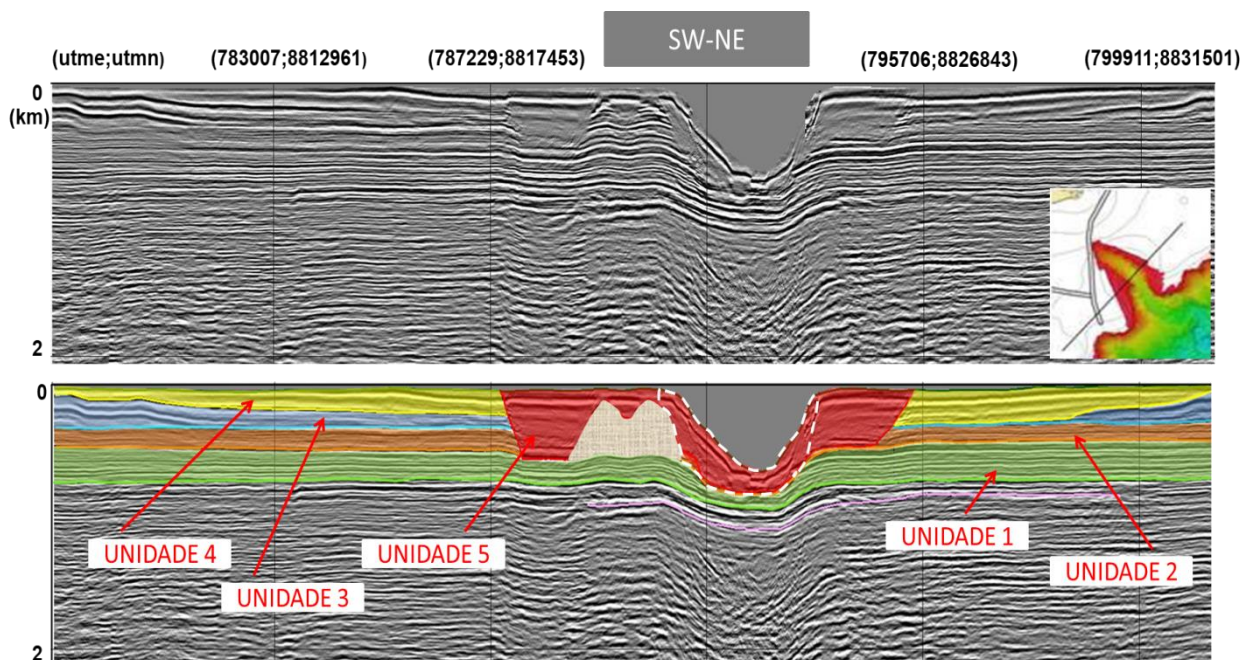


Figura 3: Seção Sísmica 1 (inline) - Não interpretado (figura superior) e interpretado (figura inferior). O pequeno quadro interno junto ao lado direito da imagem mostra a localização desta linha. A região da linha branca tracejada na Unidade 5 representa a região do CSF atual. A região com textura branca inserida em meio a Unidade 5 representa uma construção recifal.

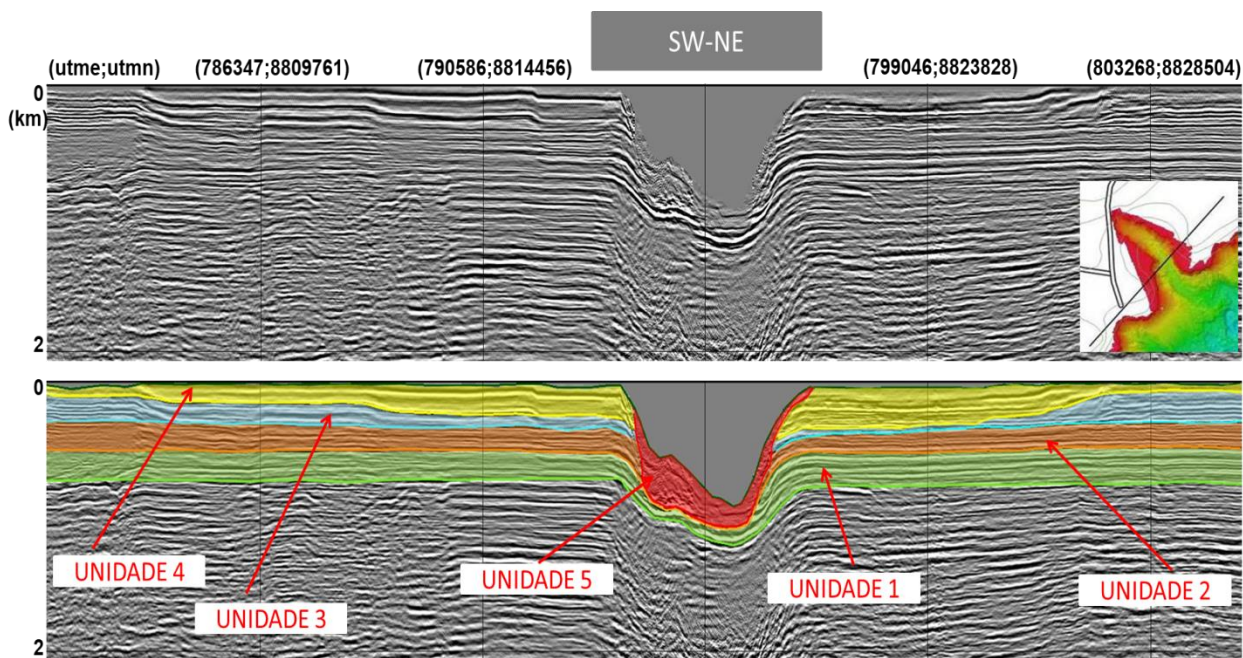


Figura 4: Seção Sísmica 2 (inline) - Não interpretado (figura superior) e interpretado (figura inferior). O pequeno quadro interno junto ao lado direito da imagem mostra a localização desta linha.

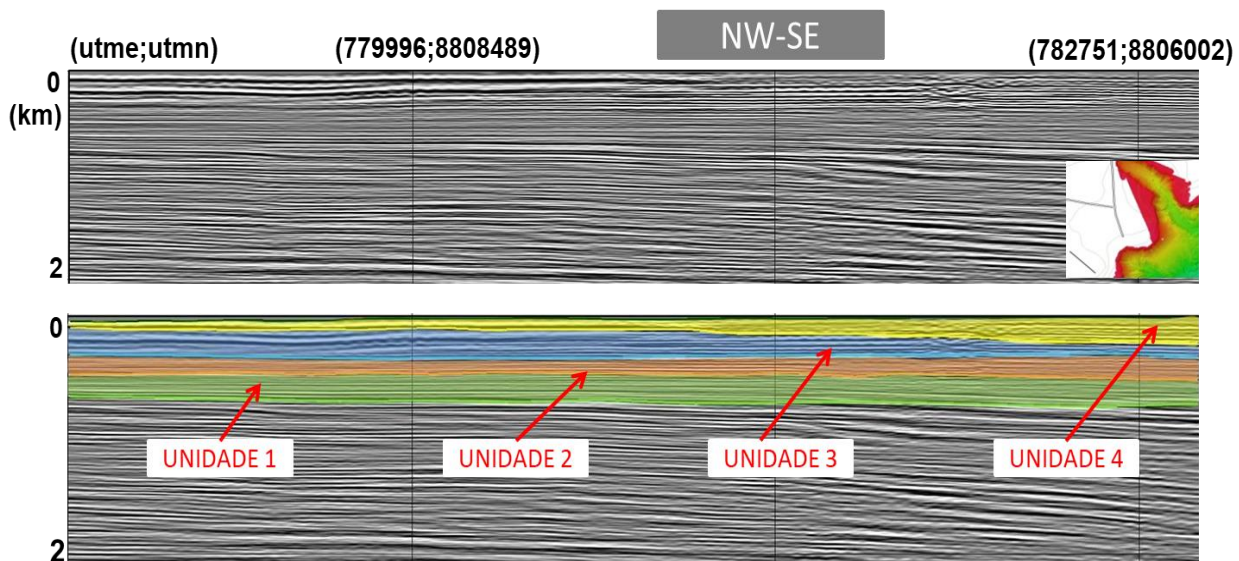


Figura 5: Seção Sísmica 3 (crossline) - Não interpretado (figura superior) e interpretado (figura inferior). O pequeno quadro interno junto ao lado direito da imagem mostra a localização desta linha.

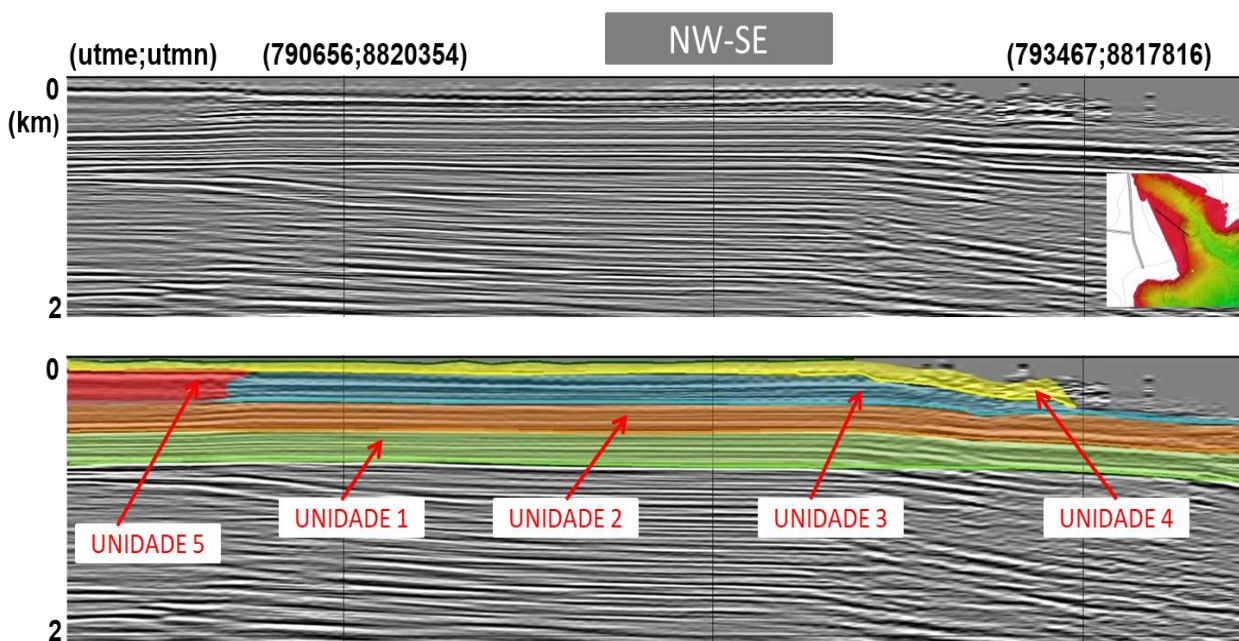


Figura 6: Seção Sísmica 4 (crossline) - Não interpretado (figura superior) e interpretado (figura inferior). O pequeno quadro interno junto ao lado direito da imagem mostra a localização desta linha.

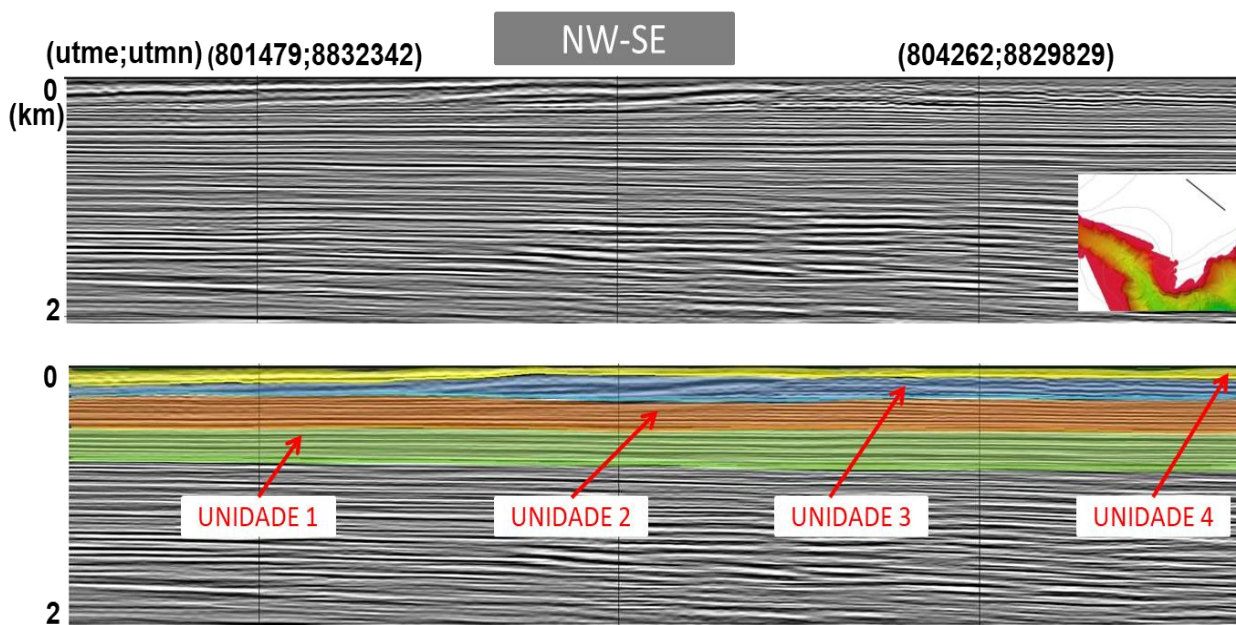


Figura 7: Seção Sísmica 5 (crossline) - Não interpretado (figura superior) e interpretado (figura inferior). O pequeno quadro interno junto ao lado direito da imagem mostra a localização desta linha.

A Unidade 4 é a unidade mais recente e tem sua geometria condicionada pela Unidade 3, que define os seus limites. A Unidade 4 apresenta refletores com configuração interna Paralela/Subparalela (Ribeiro, 2000) suavemente inclinados no sentido da cabeceira do CSF. Sua espessura máxima alcança até 290m e a deposição preenche a depressão batimétrica da porção central da plataforma. Diferentemente das outras unidades verifica-se na Unidade 4 um aumento da espessura no sentido das bordas do CSF. Seus limites externos com as regiões plataformais vizinhas são bruscos e lineares e apresentam uma expressão topográfica no fundo marinho atual, prontamente visualizada na batimetria, possivelmente de origem tectônica. Estes limites bruscos são notados de modo incipiente durante a deposição da Unidade 2, e tornam-se progressivamente mais notáveis durante a deposição das unidades 3 e 4, sugerindo uma possível atuação de falhas.

A Unidade 5 corresponde ao CSF propriamente dito. É uma unidade marcada pela ausência de refletores internos expressivos, o que caracteriza os mesmos como transparentes (Ojeda, 1988). O caráter transparente desta unidade é indicativo de pacotes sedimentares muito redobrados ou com mergulhos abruptos, além de litologias não estratificadas ou homogêneas para o método sísmico. Sua espessura máxima alcança até 408m. A extensão lateral dessa unidade aumenta no sentido do continente e seus limites coincidem aproximadamente com o paleo-cânion

miocênico identificado por Cainelli (1992). Esta unidade representa, portanto o preenchimento completo do paleo-cânion e incipiente do cânion moderno. No mapa de isópacas dessa Unidade também é possível verificar a presença de falhas.

Um possível controle estrutural está aparentemente associado à implantação do paleo-cânion e do cânion atual, devido a mudanças bruscas e lineares na espessura dos sedimentos.

Os lineamentos identificados nos mapas de isópacas, associados a mudanças bruscas de espessura apresentam direções preferenciais semelhantes as dos principais falhamentos presentes no arcabouço estrutural da bacia SE-AL, implantados no Cretáceo. Essa possível herança e o controle estrutural existente na região serão discutidos em maior detalhe mais abaixo.

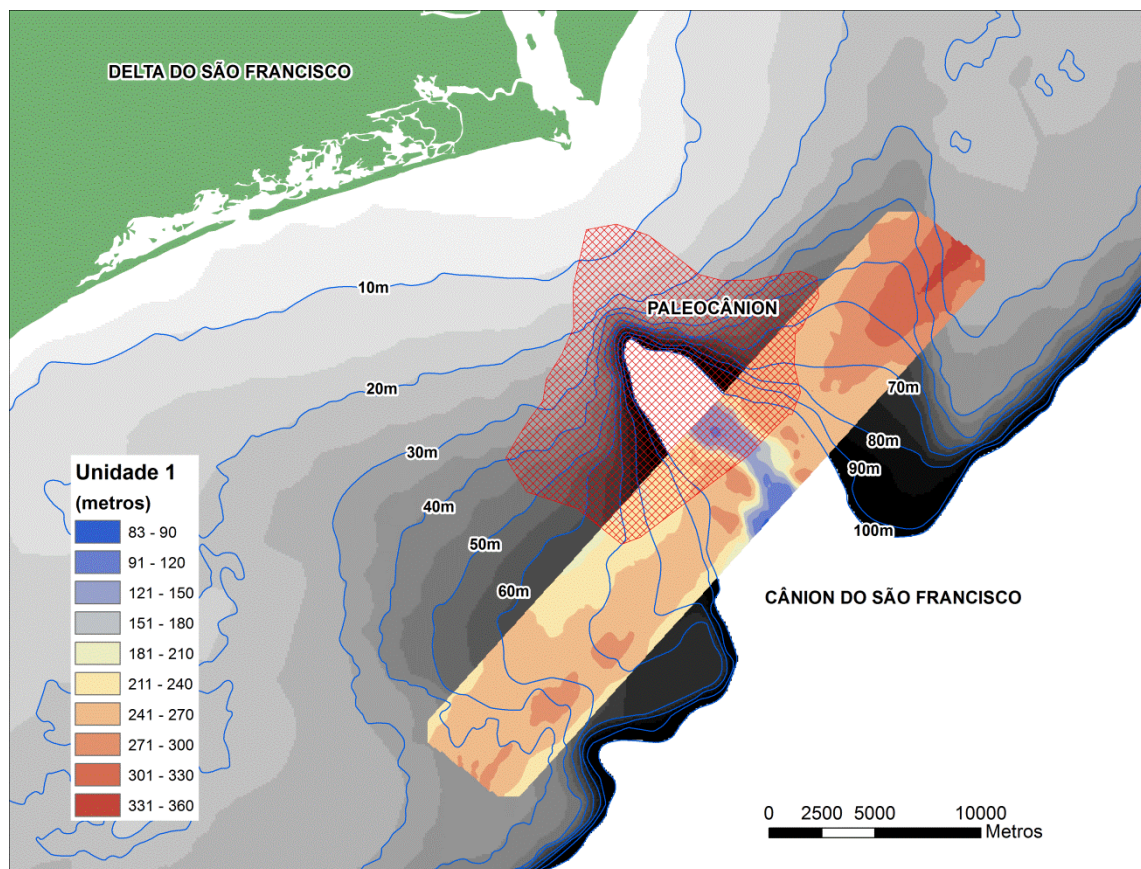


Figura 8: Isópacas da Unidade 1.

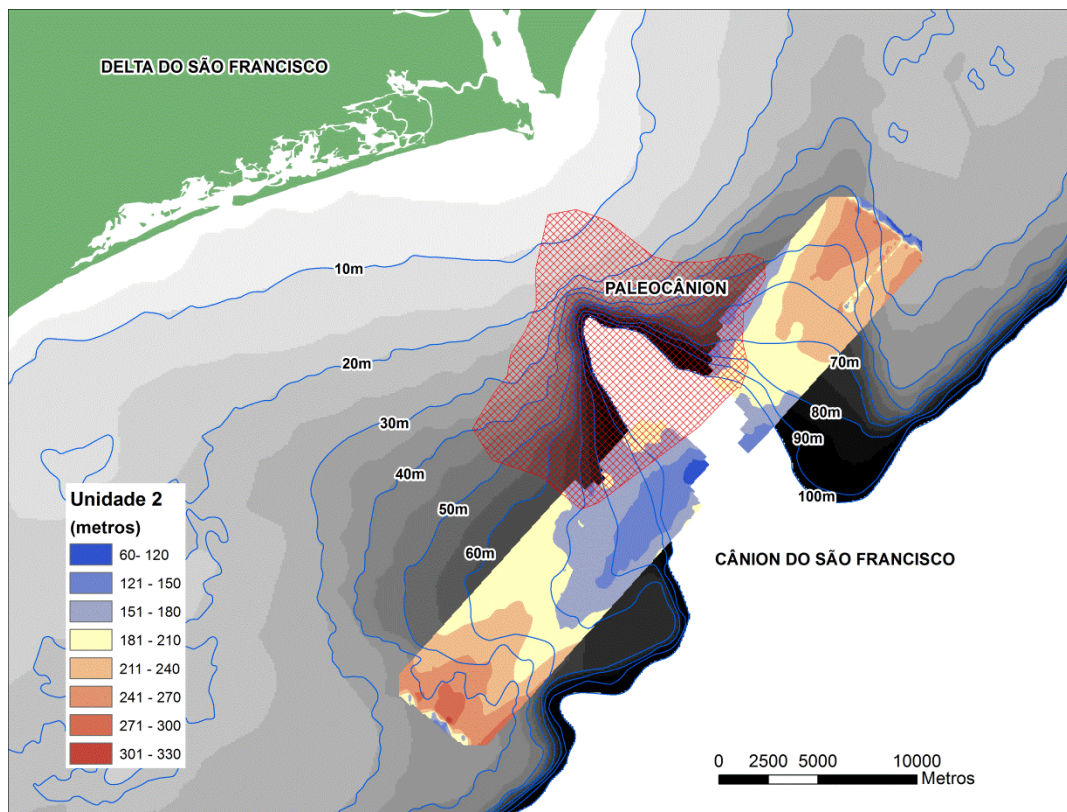


Figura 9: Isópacas da Unidade 2.

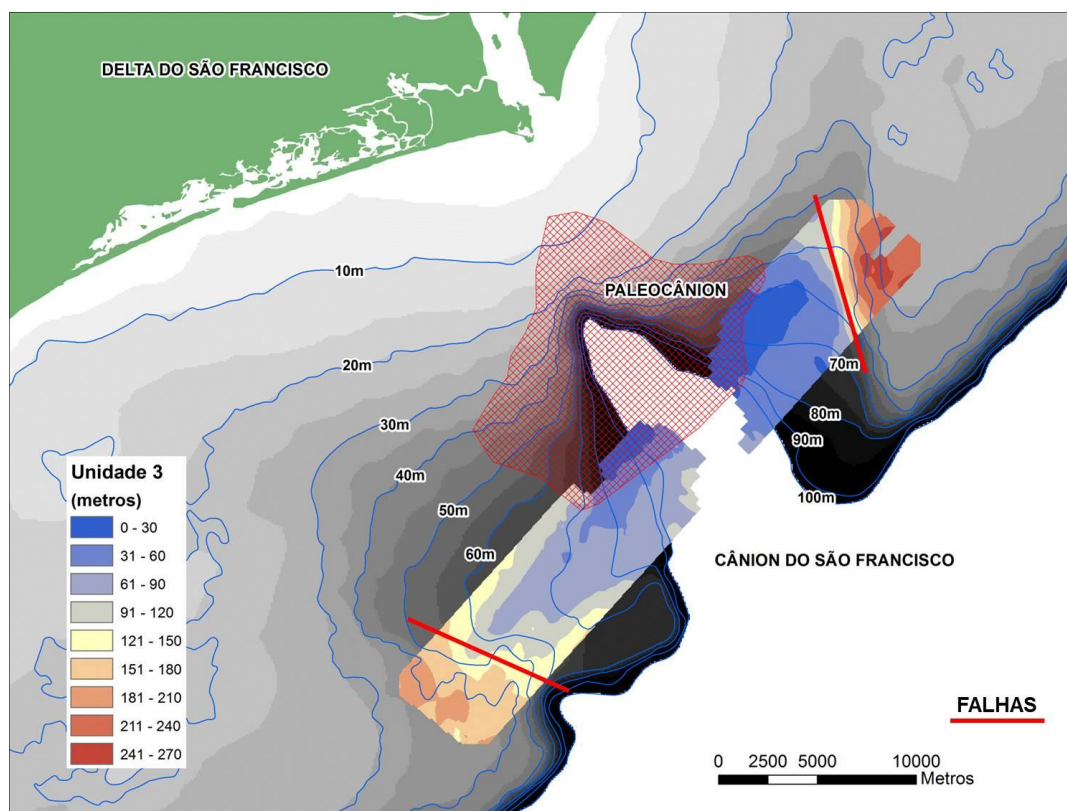


Figura 10: Isópacas da Unidade 3.



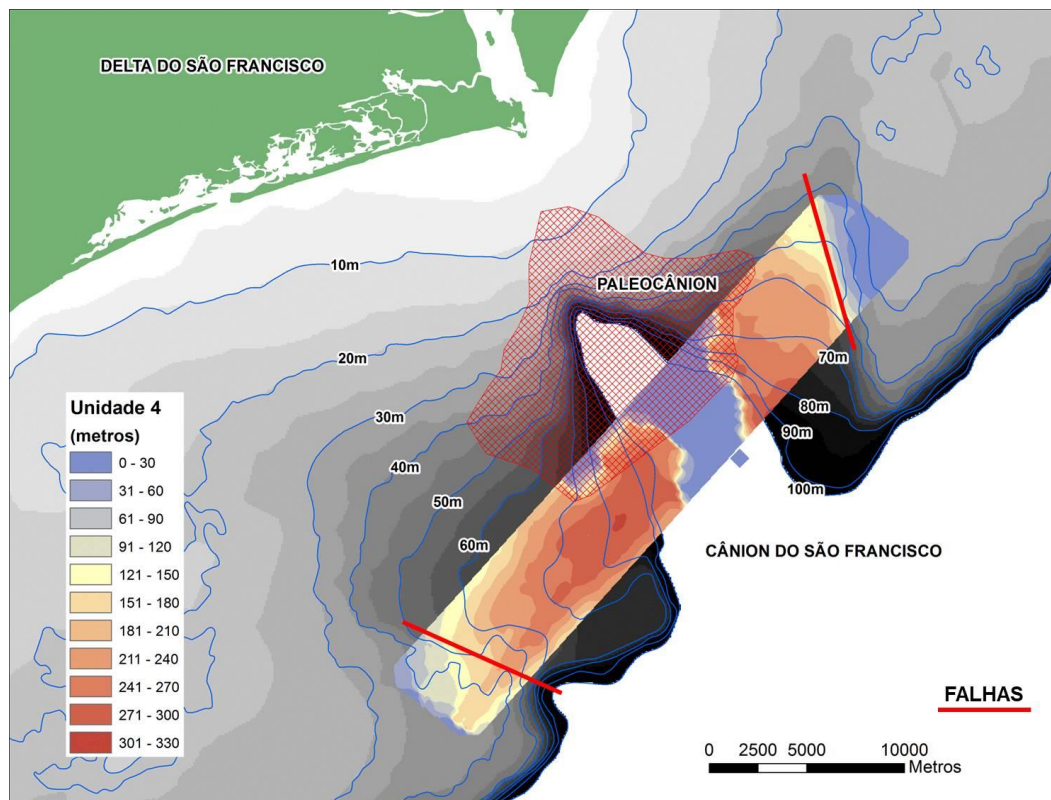


Figura 11: Isópacas da Unidade 4.

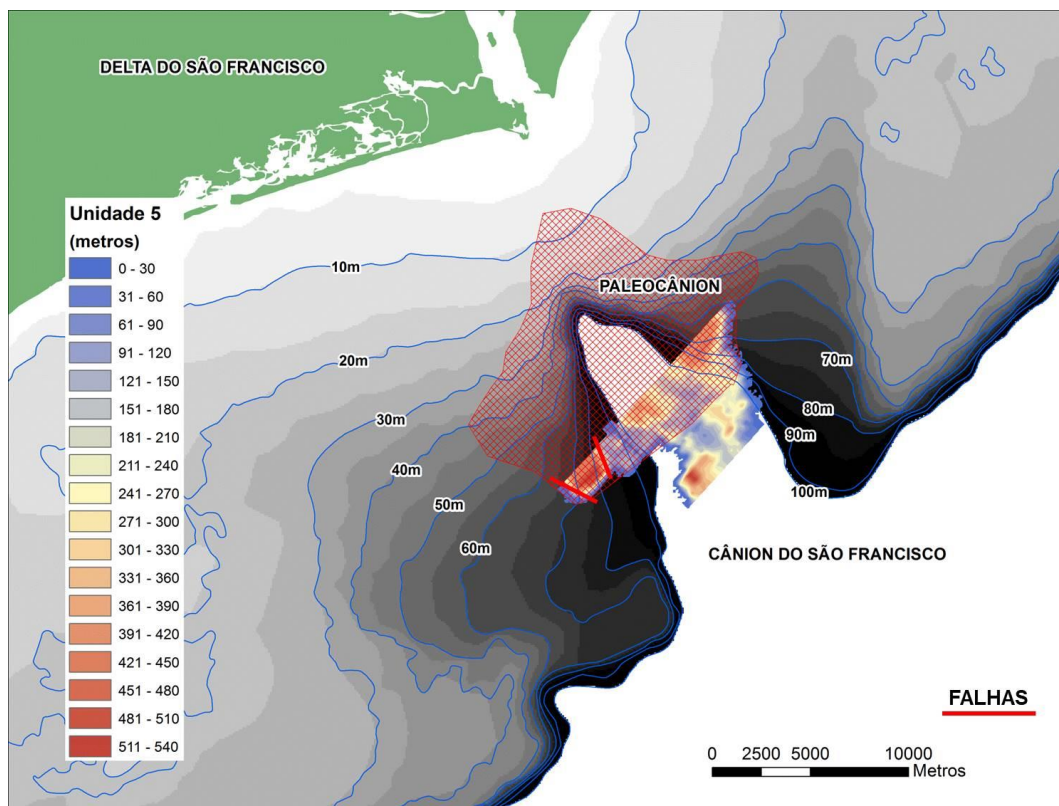


Figura 12: Isópacas da Unidade 5.

## Discussão

Segundo Melo et al. (1987), a principal fonte de sedimentos da plataforma continental de SE-AL é o rio São Francisco (RSF). O delta deste rio progradiou cerca de 25km.

A sedimentação na plataforma continental de SE-AL integra o membro Marituba, da Formação Piaçabuçu da bacia SEAL (Cainelli, 1992). Este autor subdividiu a Formação Piaçabuçu em quatro principais sequências deposicionais: sequência do Cretáceo Superior, sequência do Paleoceno, sequência do Eoceno e a sequência do Oligoceno-Quaternário. Uma comparação com os resultados de Cainelli (1992) mostra que as unidades 1, 2, 3, 4 e 5 individualizadas em nosso estudo (Figuras 3, 4, 5, 6 e 7) pertencem à sequência Oligoceno-Quaternária. Essa afirmativa se baseia no tempo em segundos (TWT) do limite inferior da sequência Oligoceno-Quaternária identificada por Cainelli (1992) (entre 0,5 e 1 seg).

Cainelli (1992) identificou um precursor pós-miocênico do cânion moderno (o paleocânion do São Francisco), o qual foi totalmente preenchido e posteriormente reescavado pelo moderno CSF.

Segundo Cainelli (1992), não existem evidências aparentes de algum tipo de controle tectônico na escavação do CSF, ao contrário do que se verifica no cânion moderno do Japarutuba, este último apresentando um forte alinhamento com um falhamento sin-rifte da região (Falha de Piranhas) de direção principal NE-SW.

O CSF adentra cerca de 18km a plataforma continental e sua cabeceira é contígua à clinofoma deltaica do DSF, o que sugere uma possível relação genética entre os dois.

Como visto as unidades 3, 4 e 5, devido às variações bruscas de espessura, experimentaram algum controle por falhas, que possibilitaram a criação de espaço adicional de acomodação para a sedimentação deltaica.

A geometria das isóbatas atuais mostra que a clinofoma e a cabeceira do cânion estão situadas em uma região topograficamente rebaixada cujos limites coincidem com as falhas identificadas nas unidades 3, 4 e 5. Estas falhas seguem os mesmos alinhamentos das falhas do arcabouço estrutural da bacia SE-AL (ver mapas de isópacas, figuras 10, 11 e 12) e exercem um controle sobre a sedimentação moderna. Cainelli (1992), entretanto, não atribuiu uma causa tectônica para a implantação do CSF.

Potter et al. (2009) chamaram a atenção para a influência da tectônica Miocênica na modelagem da paisagem e na circulação oceânica e atmosférica do mundo moderno. Eles sugerem que fenômenos ocorridos nessa época, praticamente modelaram a paisagem terrestre como conhecemos hoje. O Mioceno médio e o superior foram palco de grandes atividades tectônicas nos continentes e as margens passiva e convergente da América do Sul sofreram suas influências. Esta reativação tectônica poderia de alguma maneira ter originado pequenos falhamentos nas unidades mais superficiais (unidades 3, 4 e 5) que assim controlariam os padrões de sedimentação verificados (Figuras 3 a 7).

Com base nestes pressupostos poderíamos, ainda que não disponhamos de dados cronológicos, propor a seguinte sequência de eventos:

A Unidade 1 a primeira a ser depositada apresenta refletores contínuos de elevada amplitude. No momento de sua deposição ainda não havia se iniciado a implantação do paleocânion ou do CSF atual. Esta unidade poderia ter se depositado durante o episódio de nível de mar alto do Mioceno médio/inferior tendo em vista a sua notável uniformidade e continuidade lateral. Na zona costeira este nível de mar alto deixou como testemunho a Formação Barreiras (Rosseti et al. 2009). A Unidade 1 teria se depositado em ambiente plataformal.

Uma reativação de falhas no Mioceno é também defendida por Lima et al. (2014). Após esta reativação teria se instalado o paleocânion do São Francisco, cuja idade é atribuída como Pós-miocênica (Cainelli, 1992) e que foi posteriormente totalmente preenchido. Em seguida, ocorreu a implantação do CSF atual, datado do Plioceno/Pleistoceno (Cainelli, 1992).

Quando a Unidade 2 foi depositada, o paleo CSF já estava instalado. A geometria dos refletores é semelhante aquele presente na Unidade 1, porém com menor amplitude, sugerindo um aumento de profundidade com conseqüente diminuição de energia.

Quando da deposição da Unidade 3 o baixo topográfico existente na plataforma média já estava presente, e, portanto ativo o controle estrutural, resultando em um espaço adicional de acomodação. Pelo menos no trecho englobado pelo levantamento sísmico observa-se uma importante contribuição lateral de sedimentos plataformais para o interior deste baixo topográfico e no sentido do continente, conforme já apontado.

Estes sedimentos muito provavelmente são de origem carbonática, uma vez que essa sedimentação caracteriza a plataforma externa. É provável que o preenchimento do paleo CSF tenha iniciado nessa época.

A deposição da Unidade 4 marca provavelmente o início do aporte mais significativo de sedimentos siliciclásticos associados ao delta do São Francisco que progradam no sentido de costa-afora, em “onlap” sobre os sedimentos da Unidade 3. A sedimentação da Unidade 4 apresenta também um forte controle estrutural como mostra o mapa de isópacas. Lima et al (2014) sugere mais dois eventos de reativação de falhas durante o Quaternário que, segundo os autores, possibilitou a deposição de sedimentos e a construção da morfologia do DSF como conhecemos hoje. É possível que a chegada deste aporte de sedimentos siliciclásticos tenha reativado a incisão do CSF moderno. A deposição da Unidade 4 teria ocorrido no Plioceno-Quaternário associada ao abaixamento do nível médio do mar devido às glaciações quaternárias.

A Unidade 5 está associada à sedimentação que preenche o paleo-CSF e parcialmente o cânion moderno e é provavelmente contemporânea às unidades 3 e 4.

## **Conclusão**

O presente trabalho investigou a partir de uma integração de dados sísmicos e geológicos possíveis controles estruturais no desenvolvimento do delta do rio São Francisco. Foram individualizadas 05 unidades sísmicas que mostram que o delta foi depositado sob a influência de um controle estrutural que originou uma região deprimida na porção central da plataforma. Este baixo teria sido criado por reativações de falhas da bacia SEAL durante o Mioceno. A depressão foi inicialmente preenchida por sedimentos oriundos da porção externa da plataforma continental. Estes sedimentos de provável origem carbonática, foram sucedidos no tempo por um aporte maior de sedimentos siliciclásticos oriundos do rio São Francisco. Este maior aporte de sedimentos para a região externa da plataforma estaria associado ao abaixamento do nível médio do nível do mar associado às glaciações quaternárias. O aumento do aporte fluvial teria também favorecido a reativação do CSF.

## **Referências**

AQUINO, G.S., LANA, M.C. (1990). Exploração na Bacia de Sergipe-Alagoas: o “estado da arte”. Boletim de Geociências da Petrobrás, 4(1):75-84.

ARMSTRONG, C., MOHRIG, D., HESS, T., GEORGE, T., STRAUB, K. M. (2014). Influence of growth faults on coastal fluvial systems: Examples from the late Miocene to Recent Mississippi River Delta, *Sedimentary Geology* 301 (2014) 120–132.

BARBOSA, L. M.; DOMINGUEZ, J. M. L. (2004). Coastal Dune Fields at the São Francisco River Strandplain, Northeastern Brazil: morphology and environmental controls. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, Inglaterra, p. 443-456.

BITTENCOURT, A.C.S.P.; DOMINGUEZ, J.M.L.; FONTES, L.C.S.; SOUSA, D.L.; SILVA, I.R.; SILVA, F.R. (2007). Wave refraction, river damming, and episodes of severe shoreline erosion: the São Francisco river mouth, northeastern Brazil. *Journal of Coastal Research*. 23 (4). p. 930-938.

BHATTACHARYA, J. P. (2006). Deltas. In: *Facies Models Revisited*, Society for Sedimentary Geology, p. 237- 292.

BHATTACHARYA, J.P.; GIOSAN, L. (2003). Wave-influenced deltas: geomorphological implications for facies reconstruction. *Sedimentology*. 50. p.187-210.

BHATTACHARYA, J. P.; WALKER, R. G.; JAMES, N. P. (1992). (eds.): *Facies Models - Response to sea level change*. Toronto. Geological Association of Canada. p. 157-178.

CAINELLI, C. (1992). Sequence stratigraphy, canyons, and gravity mass flow deposits in the Piaçabuçu Formation, Sergipe-Alagoas Basin, Brazil. 233 f. Thesis (Phd)- The University of Texas, Austin.

CAINELLI, C. (1994). Shelf processes and canyon/channel evolution controlling turbidite systems. Exemples from the Sergipe-Alagoas Basin, Brazil. In: *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Gulf Coast Section. Research Conference, 15., Houston. Proceedings...* Houston: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. p. 39-50.

CAINELLI, C.; MOHRIAK, W.U. (1998). Geology of Atlantic Eastern Brazilian basins. In: AAPG, International Conference & Exhibition Short Course – Brazilian Geology Part II, Rio de Janeiro, Brazil, 67 p.

CAINELLI, C.; MOHRIAK, W.U. (1999b). Some remarks on the evolution of sedimentar basins along the Eastern Brazilian continental margin. *Episodes*, 22(3):206-216.

CARMINATI, E., MARTINELLI, G., and SEVERI, P. (2003). Influence of glacial cycles and tectonics on natural subsidence in the Po Plain (Northern Italy): Insights from 14C ages: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 4, p. 1082.

COLEMAN, J.M.; WRIGHT, L.D. (1975). Modern river deltas: variability of processes and sand bodies. In: Broussard, M.L. (ed.), *Deltas, models for exploration*. Houston Geological Society, p. 99–149.

COUTINHO, P. N. (1976). *Geologia marinha da Plataforma Continental Alagoas-Sergipe*. 119 f. Tese (Livre Docência)- Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

DOMINGUEZ, J.M.L. (1990) Delta dominados por ondas: críticas as ideias atuais com referência particular ao modelo de Coleman & Wright. *Revista Brasileira de Geociências*, 20 (1-4). p. 352-361.

DOMINGUEZ, J.M.L. (1996). The São Francisco strandplain: a paradigm for wave-dominated deltas. *Geological Society Special Publication 117*: 217-231.

DOMINGUEZ, J.M.L.; BITTENCOURT, A.C.S.P; MARTIN, L. (1983). O papel da deriva litorânea de sedimentos arenosos na construção das planícies costeiras associadas às desembocaduras dos rios São Francisco (SE-AL), Jequitinhonha (BA), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). *Revista Brasileira de Geociências*. 13(2). p. 98-105.

FALKENHEN, F. U. H.; FERNANDES, G. & CAINELLI, J. A. (1986). Análise da Bacia de Sergipe-Alagoas. Rio de Janeiro, Depex/Sedoc/ Petrobrás. Relatório Interno, 220p.

FONTES, L.C.; KOWSMANN, R.O.; PUGA-BERNABÉU, A. (2017). Caracterização Ambiental da Bacia Sergipe e sul de Alagoas, editora UFS, Sergipe, Brasil.

GALLOWAY, W. E. (1975). Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. In: Broussard, M. L. (ed.) Deltas, models for exploration. Houston Geological Society, Houston, p. 87-98.

GOODBRED, S.L.; KUEHL, S.A.; STECKLER, M.S.; and SARKER, M.H. (2003), Controls on facies distribution and stratigraphic preservation in the Ganges-Brahmaputra delta sequence: *Sedimentary Geology*, v. 155, p. 301–316.

GUIMARÃES, J.K. (2010). Evolução do delta do rio São Francisco – estratigrafia do Quaternário e relações morfodinâmicas. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências. Orientador: José Maria Landim Dominguez. 127p.

LANA, M.C. (1985) Rifting na Bacia de Sergipe-Alagoas, Brasil. Tese de mestrado, Univ. Fed. Ouro Preto 124p.

LIMA, C.U.; BEZERRA, H.R.; NOGUEIRA, C. C.; RUBSON, P.; SOUZA, O.L. (2014). Quaternary fault control on the coastal sedimentation and morphology of the São Francisco coastal plain, Brazil. *Tectonophysics* , 633, 98-114.

MELO, V.; PENA, A. G.; DIAS, C. R.; PEREIRA, C. A. G. ; ANDRÉ, D. L.; COSTA, R.; SOUTO, J. J. N.; RODRIGUES, J. J. G.; VAN DER VEM, P. H.; CASTELLANI, R. T. (1987). Projeto Calumbi: Petrobrás internal Report.

MILLIMAN J. D.; SUMMERHAYES C. P.; BARRETO, H. T. (1975). Quaternary sedimentation on the Amazon continental margin: model. Geological Society of America Bulletin, New York, v. 86, n. 5, p. 610-614.

MITCHUM, R. M.; Jr., VAIL, P. R.; THOMPSON, S. III. (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea-level, part 2: the depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis. In: Payton, C. E. (ed.), Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration. American Association of Petroleum Geologists Memoir 26, 53–62.

OJEDA, H.A.O; FUGITA, A.M. (1974). Bacia de Sergipe/Alagoas: Geologia Regional e perspectivas petrolíferas. Anais XXVIII Congr. Bras. Geol. Da S.B.G., Vol. 1:136-158. Porto Alegre.

OJEDA, H.A.O. (1988). Curso de Sismoestratigrafia (Notas Preliminares). Rio de Janeiro, Petrobras/Sedes. 236 p. (Apostila – não publicado).

PONTE, F.C. (1969), Estudo Morfo-Estrutural da Bacia Alagoas-Sergipe – Bol. Tec. Petrobras 12 (4): 439,474.

POTTER, P. E.; SZATMARI, P. (2009). Global Miocene tectonics and the modern world: Earth Science Reviews, v. 96, p. 279-295.

RANGEL, A.G.A.N. (2017). Sedimentação e Arquitetura Depositional do Delta do São Francisco Utilizando Sísmica Rasa de Alta Resolução. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências. Orientador: José Maria Landim Dominguez. 48p.

RIBEIRO, H.J.P. (2000). Estratigrafia de Sequências – Fundamentos e Aplicações. São Leopoldo, Edusinos, 428p.



RIBEIRO, R. F. (2016). Geomorfologia do Cânion do São Francisco e do Talude Adjacente, com Base em Dados de Batimetria Multifeixe. Monografia. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. Salvador/BA, Brasil. 44p.

ROSSETTI, D. F; Góes, A. M. (2009). Marine influence in the Barreiras Formation, State of Alagoas, Northeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* n. 81, p. 741- 755.

SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; JIMENÉZ, J.A.; VALDEMORO, H.I. (1998). The Ebro delta: morphodynamics and vulnerability. *Journal of Coastal Research* 14 (3): 754–772

SANGREE, J.B.; WIDMIER, J.M. (1997). Seismic stratigraphy and global changes in sea level, 9, Seismic interpretation of depositional facies, in *Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration*, edited by C.E. Payton, pp. 165-184, Am. Assoc. Pet. Geol., Tulsa, Okla.

SILVA, I.R. (2008). Ambientes Costeiros. In: SILVA, A.J.C.L.P.; ARAGÃO, M.A.N.F., MAGALHÃES, A.J.C. (orgs.) *Ambientes de Sedimentação Siliclástica do Brasil*. São Paulo. p. 212-223.

SOUZA-LIMA, W. (2006). Litoestratigrafia e evolução tectono-sedimentar da bacia de Sergipe-Alagoas, introdução. *Fundação Paleontológica Phoenix*. Aracaju. Ano 8. n. 89.

STANLEY D.J. (1988). Subsidence in the northeastern Nile delta: Rapid rates, possible causes, and consequences: *Science*, v. 240, p. 497–500.

## CAPÍTULO 3

### CONCLUSÕES

---

O presente trabalho investigou a partir de uma integração de dados sísmicos e geológicos possíveis controles estruturais no desenvolvimento do delta do rio São Francisco. Foram individualizadas 05 unidades sísmicas que mostram que o delta foi depositado sob a influência de um controle estrutural que originou uma região deprimida na porção central da plataforma. Este baixo teria sido criado por reativações de falhas da bacia SEAL durante o Mioceno. A depressão foi inicialmente preenchida por sedimentos oriundos da porção externa da plataforma continental. Estes sedimentos de provável origem carbonática, foram sucedidos no tempo por um aporte maior de sedimentos siliciclásticos oriundos do rio São Francisco. Este maior aporte de sedimentos para a região externa da plataforma estaria associado ao abaixamento do nível médio do nível do mar associado às glaciações quaternárias. O aumento do aporte fluvial teria também favorecido a reativação do CSF.

## **APÊNDICE A**

### **JUSTIFICATIVA CO-AUTORES**

---

#### **1. PROF. DR. JOSÉ MARIA LANDIM DOMINGUEZ**

Orientador da aluna. Acompanhou e guiou a aluna em todas as etapas do desenvolvimento desse trabalho, fornecendo dados e informações para que o mesmo se tornasse possível.

#### **2. PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. ALANNA COSTA DUTRA**

Co-orientadora da aluna. Forneceu dados e informações geofísicas para a realização desse trabalho.

## ANEXO A

# REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA

---

### REVISTA: GEOLOGIA USP SÉRIE CIENTÍFICA

#### Diretrizes para Autores

1. PÁGINA DE ROSTO – deverá conter: três títulos, em português, em inglês e título curto no idioma principal do manuscrito com no máximo 50 caracteres, contando os espaços; nome completo e instituição de origem dos autores; endereço completo do **autor principal** (logradouro, CEP, cidade, estado, país, caixa postal e telefone para contato), e-mail de todos os autores; número de palavras; total de figuras e de tabelas.

2. RESUMO E ABSTRACT – em um único parágrafo, devem ser concisos, com no máximo 270 palavras. Textos mais longos devem vir acompanhados de justificativa circunstanciada.

3. PALAVRAS-CHAVE E KEYWORDS – máximo seis, separadas por ponto e vírgula, com a primeira letra em maiúscula. Ex.: Bacia do Araripe; Quaternário; Fácies; Depósitos magmáticos.

Os descritores em inglês devem acompanhar os termos em português.

4. TEXTO PRINCIPAL – poderá ser redigido em português ou inglês. Elaborar em Word, fonte Times New Roman, tamanho 12, espaço simples. **O tamanho máximo aceito para publicação é de 25 páginas, incluindo texto, resumo, abstract, tabelas, figuras e referências bibliográficas.** Trabalhos mais longos podem ser aceitos desde que argumentos científicos que os justifiquem sejam apresentados e aceitos.

a) Na fase de submissão, inserir numeração de páginas, bem como as figuras, tabelas, legendas e referências.

b) Quando o artigo estiver devidamente aprovado para publicação, as figuras, tabelas e legendas devem ser retiradas do texto. Enviá-las separadamente e numeradas, cada uma num arquivo. As legendas devem vir em um único arquivo, separadas das figuras e tabelas.

## 5. TÍTULOS

a) Título do artigo

Título principal – **Negrito, caixa alta na primeira letra da primeira palavra e caixa baixa nas demais.**

Título em inglês – Itálico, caixa alta na primeira letra da primeira palavra e caixa baixa nas demais (sem negrito).

Título curto: Caixa alta na primeira letra da primeira palavra e caixa baixa nas demais (sem negrito/sem itálico).

b) Títulos e subtítulos no interior do artigo

Nível 1 – **NEGRITO, CAIXA ALTA.**

Nível 2 – **Negrito, caixa alta na primeira letra da primeira palavra e caixa baixa nas demais.**

Nível 3 – Itálico, caixa alta na primeira letra da primeira palavra e caixa baixa nas demais (sem negrito).

Nível 4 – Caixa alta na primeira letra da primeira palavra e caixa baixa nas demais (sem negrito).

6. TABELAS E QUADROS – considerar quadro como tabela. Elaborar em Word, no modo “tabela”, com formato aberto, fonte Arial, tamanho 8. Obedecer as medidas: 8,2 cm (uma coluna) ou 17 cm (duas colunas), comprimento máximo de 22 cm, incluindo a legenda. Tabelas muito extensas deverão ser divididas.

a) Na fase de submissão, inserir as tabelas no texto, juntamente com a legenda, com a devida numeração sequencial.

b) Quando o artigo estiver devidamente aprovado para publicação, as tabelas devem ser retiradas do texto. Enviá-las separadamente e numeradas, cada uma num arquivo. As legendas devem vir em um único arquivo, separadas das tabelas.

c) Legendas: fonte Times New Roman, tamanho 12. (sem itálico)

7. ILUSTRAÇÕES – mapas, fotos, figuras, gráficos, pranchas, fotomicrografias etc., considerar como figuras. Utilizar fonte Arial, tamanho 9. Obedecer as medidas: 8,2 cm (uma coluna) ou 17 cm (duas colunas), comprimento máximo de 22 cm, incluindo a legenda.

a) Na fase de submissão, inserir as figuras no texto, juntamente com a legenda, com a devida numeração sequencial.

b) Quando o artigo estiver devidamente aprovado para publicação, as figuras devem ser retiradas do texto. Enviá-las separadamente e numeradas, cada uma num arquivo. **Deverão estar em formato JPEG, TIFF ou EPS, com resolução mínima de 300 dpi.** As legendas devem vir em um único arquivo, separadas das figuras.

c) Legendas: fonte Times New Roman, tamanho 12. (sem itálico)

8. CITAÇÕES NO TEXTO – exemplos de citação direta / citação indireta:

a) Um autor

Santos (1980) / (Santos, 1980)

b) Dois autores

Norton e Long (1995) / (Norton e Long, 1980)

c) Mais de dois autores

Moorbath et al. (1992) / (Moorbath et al., 1992)

d) Congressos, conferências, seminários etc.

... no Congresso Brasileiro de Geologia (1984) / (Congresso Brasileiro de Geologia, 1984)

e) Vários trabalhos de diferentes autores

Smith (1985), Rose e Turner (1986) e Johnson et al. (1990) / (Smith, 1985; Rose e Turner, 1986; Johnson et al., 1990)

f) Citação de vários trabalhos de um mesmo autor

Smith (1979a, 1979b, 1981) / (Smith, 1979a, 1979b, 1981)

9. REFERÊNCIAS – listar no final do texto, em ordem alfabética de autores e, dentro dessa sequência, em ordem cronológica. **A exatidão das referências bibliográficas é de inteira responsabilidade dos autores.**

EXEMPLOS DE REFERÊNCIAS:

a) Livro com um autor

Middlemost, E. A. K. (1997). *Magma, rocks and planetary development: A Survey of Magma/Igneous Rock Systems*. Harlow: Longman.

b) Livro com dois autores

Anderson, M. P., Woessner, W. W. (1992). *Applied groundwater modeling. Simulation of low and advective transport*. San Diego: Academic Press.

c) Livro com três ou mais autores

Harland, W. B., Armstrong, R. L., Cox, A. L. V., Craig, L. E., Smith, A., Smith, D. (1989). *A geologic time scale* (2<sup>nd</sup> ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

d) Capítulo de livro

Almeida, F. F. M., Amaral, G., Cordani, U. G., Kawashita, K. (1973). The Precambrian evolution of the South American cratonic margin south of Amazonas River. In: A. E. Nairn, F. G. Stille (Eds.), *The ocean basin and margins*, 1, 411-446. New York: Plenum.

(Exemplo de Publicação seriada)

L. Harris, N. , Pearce, J. , Tindle, A. (1986). Geochemical collision-zone magmatism. In: Coward M. P., Ries A. C. (ed.) *Collision tectonics*. 67-81. London: Geological Society. (Geological Society Special Publication, 19).

e) Artigo de periódico

Caffe, P. J., Soler, M. M., Coira, B. L., Cordani, U. G., Onoe, A. T. (2008). The granada ignimbrite: a compound pyroclastic unit and its relationship with upper miocene caldera volcanism in the northern Puna. *Journal of South American Earth Science*, 25(4), 464-484.

f) Trabalho apresentado em evento

Danni, J. C. M., Ribeiro, C. C. (1978). Caracterização estratigráfica da sequência vulcano-sedimentar de Pilar de Goiás e de Guarinos, Goiás. *XXX Congresso Brasileiro de Geologia*, 2, 582-596. Recife: SBG.

g) Mapa

Inda, H. A. W., Barbosa, J. F. (1978). *Mapa Geológico do Estado da Bahia*. Escala 1:1.000.000. Salvador: Secretaria de Minas e Energia do Estado da Bahia/ CBPM.

h) Teses e Dissertações

Petta, A. R. (1995). *Estudo geoquímico e relações petrogenéticas do batólito múltiplo composto São Vicente/ Caicó (RN-Brasil)*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP.

i) Documentos em meio eletrônico

Livro

Sharkov, E. (2012). *Tectonics: Recent Advances*. Croatia: InTech, <<http://www.intechopen.com/books/tectonics-recent-advances>>.

Artigo de periódico



Soares, E. A., Tatumi, S. H. (2010). OSL age determinations of pleistocene fluvial deposits in Central Amazonia. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 82(3), 691-699. Acesso em 14 de fevereiro de 2011, <<http://www.scielo.br/pdf/aabc/v82n3/17.pdf>>.

Trabalho apresentado em evento

Souza-Lima, W., Farias, R. M. (2007). A flora quaternária dos travertinos de Itabaiana, Sergipe. *PALEO 2007* (p. 7). Itabaiana: SBP. Acesso em 18 de dezembro de 2008, <[http://www.phoenix.org.br/Paleo2007\\_Boletim.pdf](http://www.phoenix.org.br/Paleo2007_Boletim.pdf)>.

j) Com numeração DOI

Livro

Zavattini, J. A. (2009). *As chuvas e as massas de ar no estado de Mato Grosso do Sul: estudo geográfico com vista à regionalização climática*.

DOI: 10.7476/9788579830020.

Artigo de periódico

Evandro, L., Kleina, E. L., Rodrigues, J. B., Lopesa, E. C. S., Gilvana, L. Soledade, G. L. (2012). Diversity of Rhyacian granitoids in the basement of the Neoproterozoic-Early Cambrian Gurupi Belt, northern Brazil: Geochemistry, U–Pb zircon geochronology, and Nd isotope constraints on the Paleoproterozoic magmatic and crustal evolution. *Precambrian Research*, 220-221, 192-216.

DOI: 10.1016/j.precamres.2012.08.007.