

Avaliação de controles estruturais na evolução do delta do rio São Francisco utilizando métodos geofísicos

Evaluation of structural controls in the evolution of the São Francisco River delta using geophysical methods

Alana Aderne dos Santos¹ , José Maria Landim Dominguez¹ , Alanna Costa Dutra¹ 

¹Universidade Federal da Bahia - UFBA, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Rua Barão de Jeremoabo, s/n., Ondina, CEP 40170-290, Salvador, BA, BR (alanaaderne@gmail.com; landim@ufba.br; alannacd@ufba.br)

Recebido em 20 de março de 2018; aceito em 16 de julho de 2019

Resumo

O delta do rio São Francisco é uma planície arenosa de idade quaternária construída em um baixo estrutural da bacia de Sergipe-Alagoas, 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 de Sergipe-Alagoas. A partir de um embasamento teórico que nos aponta a existência de um controle estrutural na formação e na 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 integrado 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 cinco 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 preexistentes, 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 levam a acreditar que as falhas observadas estariam relacionadas a uma reativação de caráter tectônico da região de estudo.

Palavras-chave: Delta; Cânion Submarino; São Francisco; Método 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 basin. Thus, based on a theoretical background that indicates the existence of structural control over the formation and evolution of delta systems in general, it is possible that the Sergipe-Alagoas Basin structure has influenced the delta. This relationship can be inferred using adequate methodology. The present work consists in the use of the seismic geophysical method, integrated with the geological information of the area, having as main objective the evaluation of the existing structural controls on the formation and evolution of the São Francisco delta. The interpretation of a 3D seismic data allowed the individualization of five 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; Submarine Canyon; São Francisco; Seismic method.

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 em que o suprimento sedimentar é maior do que a capacidade dos agentes da bacia receptora (ondas, correntes, marés) de redistribuí-lo (Bhattacharya e Giosan, 2003). Ambientes deltaicos possuem grande importância, uma vez que 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 nessas regiões. O aumento significativo dos impactos ambientais causados pelo aumento da população nessas áreas tem gerado uma preocupação crescente com elas, bastante suscetíveis a problemas como erosão costeira, subsidência, enchentes e intrusão salina (Sanchez-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 et al., 1992; Dominguez, 1990, 1996; Dominguez 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 dessas feições.

Trabalhos relativamente recentes que analisam o papel da tectônica como o principal agente controlador na formação dos deltas incluem: Goodbred Jr. 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 (SEAL), 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 morfoestrutural da porção superficial da bacia SEAL, sobre a qual se encontra o delta, e concluiu pela existência de movimentações tectônicas durante o Quaternário. Mais recentemente, Lima et al. (2014) desenvolveram um estudo no DSF 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 DSF. Para tal, serão utilizados registros de um levantamento sísmico 3D (Figura 1), integrados às informações disponíveis sobre a geologia e a tectônica da região.

A área de estudo está inserida na bacia sedimentar SEAL 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).

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

Arcabouço estrutural da bacia de Sergipe-Alagoas

A bacia sedimentar SEAL é formada por um rifte assimétrico, alongado na direção NNE-SSW, abrangendo cerca de 35.000 km² (2/3 na sua porção marítima). Limita-se a norte com a bacia sedimentar de Pernambuco-Paraíba, pelo Alto de Maragogi, e a 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 entre 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, 1999).

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 Neoproterozoico e do Mesoproterozoico, respectivamente.

O arcabouço estrutural da bacia SEAL é constituído principalmente de 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. Elas são consideradas 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, junto às 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 elas se desenvolveram de maneira simultânea ou tardia com relação às demais (Ojeda e Fugita, 1974).

Os compartimentos estruturais presentes no arcabouço tectônico da bacia SEAL são separados por feições na forma de degraus, constituindo grábens ou semigrábens

(Souza-Lima, 2006). Entre 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 (RSF).

O delta do rio São Francisco

O DSF 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 em razão da deposição de sedimentos marinhos a barlar 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 ela ocorrem por meio de falésias inativas com geometria retilínea.

A planície deltaica associada à desembocadura do RSF 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; Bittencourt et al., 2007; Guimarães, 2010; Silva, 2008).

Possíveis controles estruturais no desenvolvimento do delta do São Francisco

Trabalhos anteriores já publicados sobre o DSF sugerem algum tipo de controle tectônico no seu desenvolvimento. Ponte (1969) concluiu que anomalias no padrão de drenagem atual da região indicam que altos estruturais da bacia SEAL obrigaram o RSF a contorná-los.

O autor também apontou evidências da reativação de falhas que afetaram a Formação Barreiras, próximo ao delta.

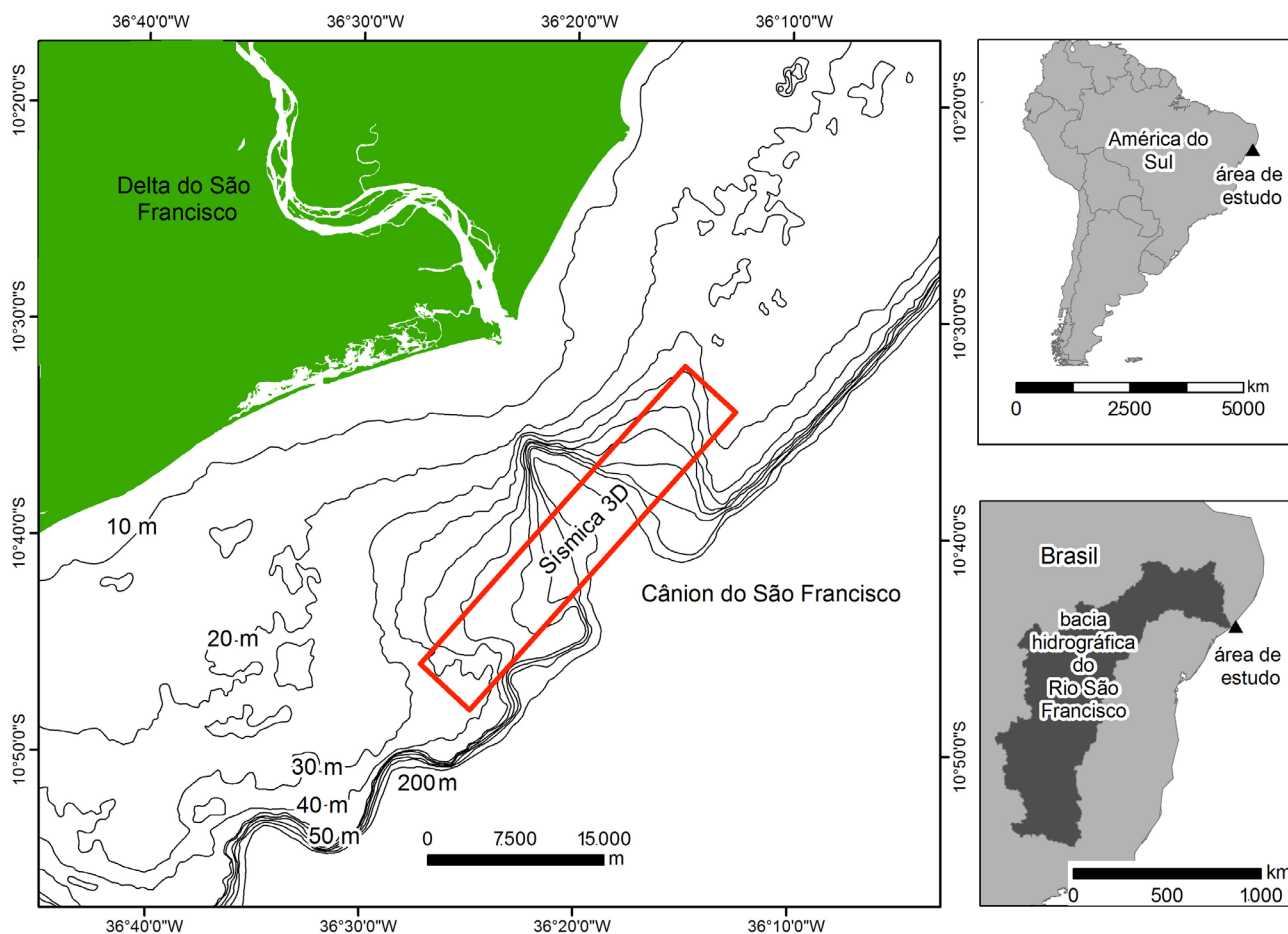


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo, compreendendo a região do delta do São Francisco, cânion do São Francisco e batimetria da área. O delta do rio São Francisco está localizado entre os limites dos estados de Sergipe e Alagoas, ambos pertencentes à região Nordeste do Brasil.

Com base no mapa estrutural sísmico do embasamento da região, Ponte (1969) chamou atenção de 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) consideraram que a reativação de falhas no Quaternário foi o principal agente controlador da deposição de sedimentos e da morfologia do delta. Esse 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 anteriormente, 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 SEAL, onde a clinofórma deltaica se desenvolveu.

Plataforma continental e o cânion do São Francisco

A plataforma continental de SEAL 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 et al. (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.

Entre as várias feições morfológicas existentes na margem continental SEAL, 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 incisivos (Fontes et al., 2017). Segundo Cainelli (1992), esses dois cânions podem ser classificados como modernos e maduros, pois ainda não foram preenchidos e por avançarem a plataforma continental.

O cânion do São Francisco avança 18 km 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 et al., 2017).

A presença do RSF na região favorece a revitalização da erosão do cânion, facilitando o seu avanço 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 Cânion do São Francisco (CSF) moderno. Esse paleocânion teria idade Pós-Miocênica, enquanto o CSF moderno teria idade do Plioceno/Pleistoceno (Cainelli, 1992).

Em função da proximidade da foz (8 km) e da elevada vazão natural histórica do RSF, 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 clinofórma lamosa, a qual, por sua vez, já começa a soterrar a cabeceira dele (Ribeiro, 2016). Essa proximidade sugere que o RSF influenciou o desenvolvimento do cânion, e que a presença dele também exerceu um papel na evolução do delta.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho consistiu da compilação de dados disponíveis na literatura sobre a geologia, o arcabouço estrutural da bacia SEAL, a batimetria da área submersa e os dados geofísicos. Esses dados foram complementados pela análise de dados de sísmica 3D.

Os dados de sísmica 3D (Figura 1) utilizados pertencem ao projeto 0253_BAI_XO_SÃO_FRANCISCO_03 e foram disponibilizados por meio de concessão para estudos acadêmicos, pela Agência Nacional de Petróleo (ANP). Esses dados sísmicos recobrem uma área de 234 km², 186 “*inlines*” separadas de aproximadamente 37 m e 1.367 “*crosslines*” separadas de aproximadamente 25 m. Das 186 “*inlines*” disponíveis, foram escolhidas 14, espaçadas regularmente de 373,5 m, recobrendo todo o polígono sísmico (Figura 2). Essas “*inlines*” foram interpretadas segundo os princípios da sismoestratigrafia, e gerados os mapas de isópacas das principais unidades mapeadas. Também foram escolhidas para auxiliar a interpretação três “*crosslines*”, de maneira a cobrir trechos representativos do polígono sísmico (Figura 2). Para a conversão tempo-profundidade, foram testados modelos que levavam em consideração as velocidades-padrão da onda no fundo marinho (≈ 1.500 m/s), nos sedimentos quaternários (≈ 1.900 m/s) e nos sedimentos da bacia ($\approx 2.300 - 2.800$ m/s). A velocidade utilizada para a conversão foi a de 2.000 m/s, aproximadamente o valor médio entre as velocidades anteriormente citadas, e foi para essa velocidade que encontramos o melhor ajuste do modelo.

RESULTADOS

A interpretação estendeu-se apenas até uma profundidade máxima de aproximadamente 1.000 m, porque o nosso interesse estava restrito aos eventos mais recentes e também porque, de acordo com Cainelli (1992), a discordância que

marca a passagem Eoceno-Oligoceno se situa aproximadamente entre 0,5 e 1,0 s de profundidade. Cinco unidades estratigráficas foram individualizadas (Figuras de 3 a 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 sedimentação uniforme sobre toda a área. A geometria dos refletores (Mitchum Jr. et al., 1977) é do tipo lençol (*sheet*), característica de ambientes plataformais. Sua espessura varia entre 130 e 326 m. 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 nessa unidade, é sugestiva da existência de construções recifais próximas à quebra da plataforma, como já apontado por Cainelli (1992). Essa 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 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 268 m. 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 Widmier, 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 Obliqua (Ribeiro, 2000),

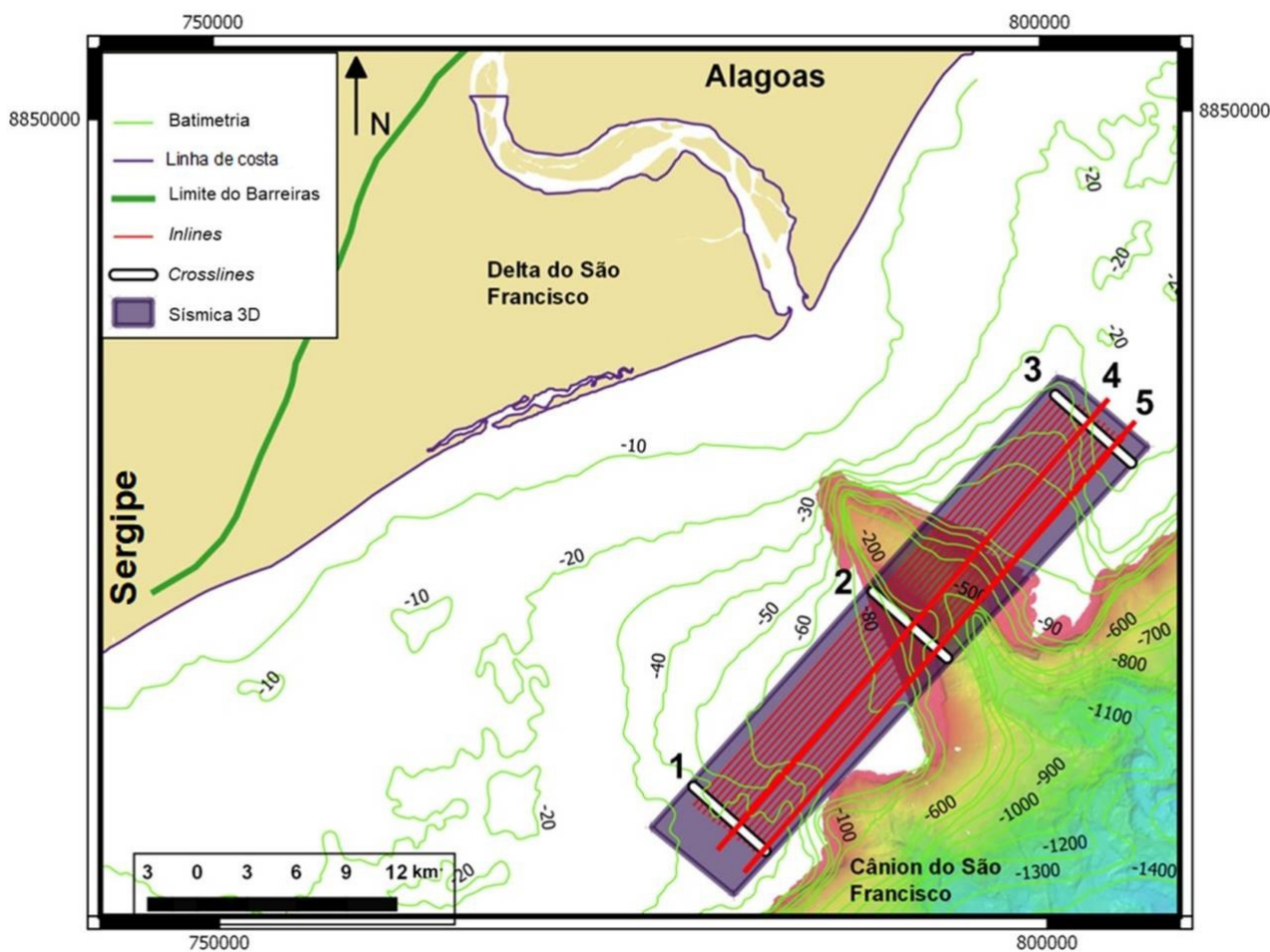


Figura 2. Mapa com a localização das “inlines” (linhas vermelhas) e das “crosslines” (linhas brancas) selecionadas para interpretação. A numeração de 1 a 5 corresponde às seções sísmicas que serão analisadas no decorrer deste trabalho.

que se caracteriza pela superposição de estratos laterais constituindo superfícies denominadas clinoformas. Sua espessura varia entre 12,5 e 238 m. 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*” dessa unidade, situadas no entorno da cabeceira do CSF, são bruscos e lineares e delimitam a depressão batimétrica mencionada anteriormente. No mapa de isópacos da Unidade 3 (Figura 10), observa-se diminuição da espessura no sentido das bordas do CSF. Também é possível verificar mudanças bruscas na espessura dos sedimentos

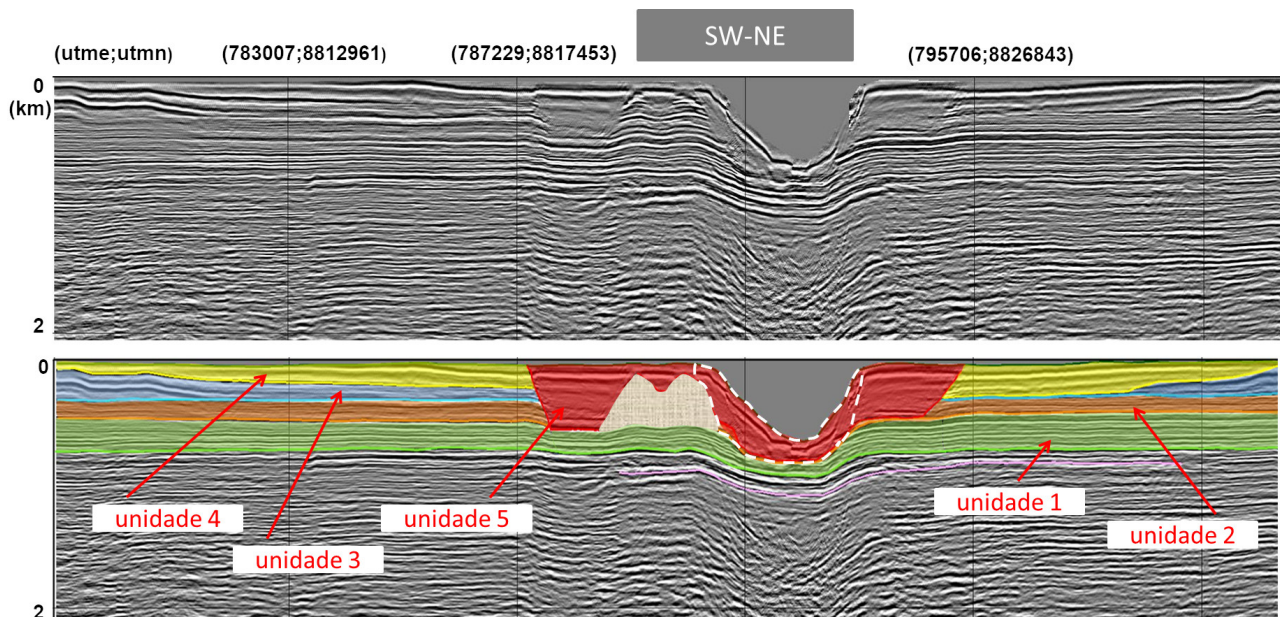


Figura 3. Seção sísmica 1 (*inline*): não interpretado (figura superior) e interpretado (figura inferior). Localização: *inline* 4 da Figura 2. A região da linha branca tracejada na Unidade 5 representa a região do Cântion do São Francisco atual. A região com textura branca inserida em meio a Unidade 5 representa uma construção recifal.

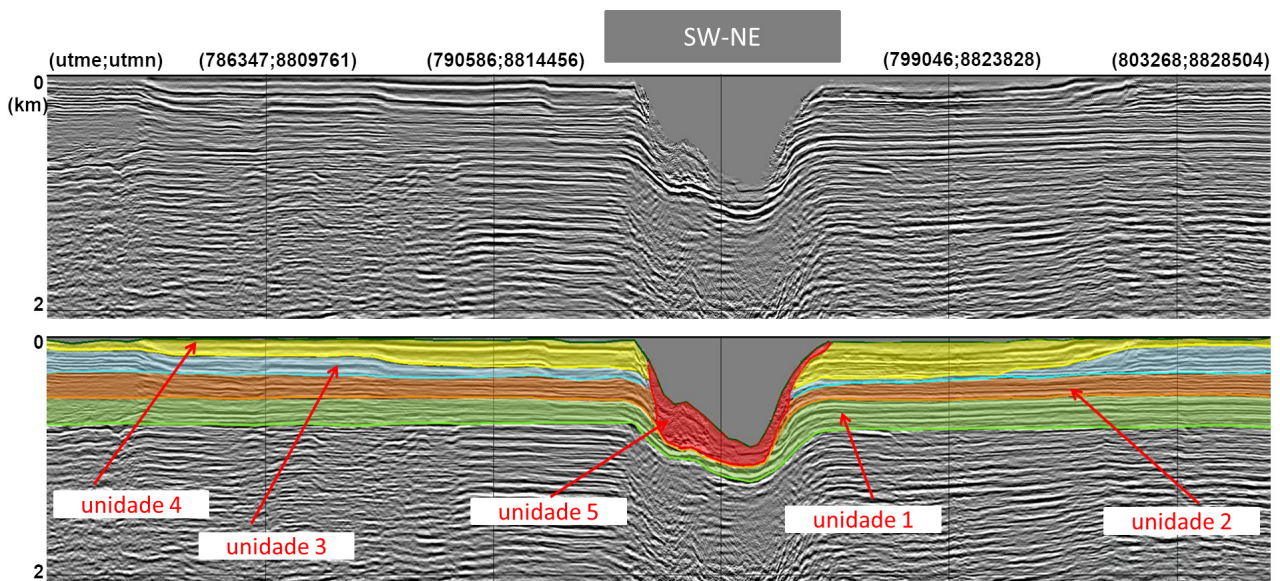


Figura 4. Seção sísmica 2 (*inline*): não interpretado (figura superior) e interpretado (figura inferior). Localização: *inline* 5 da Figura 2.

nas extremidades laterais, que podem estar associadas a falhamentos síncronos à deposição dela.

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 290 m e a deposição preenche a depressão batimétrica da porção central da plataforma. Diferentemente das outras unidades, verifica-se, na Unidade 4, 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. Esses 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 possível atuação de falhas.

A Unidade 5 corresponde ao CSF propriamente dito. É uma unidade marcada pela ausência de refletores internos expressivos, o que os caracteriza como transparentes (Ojeda, 1988). O caráter transparente dessa unidade é

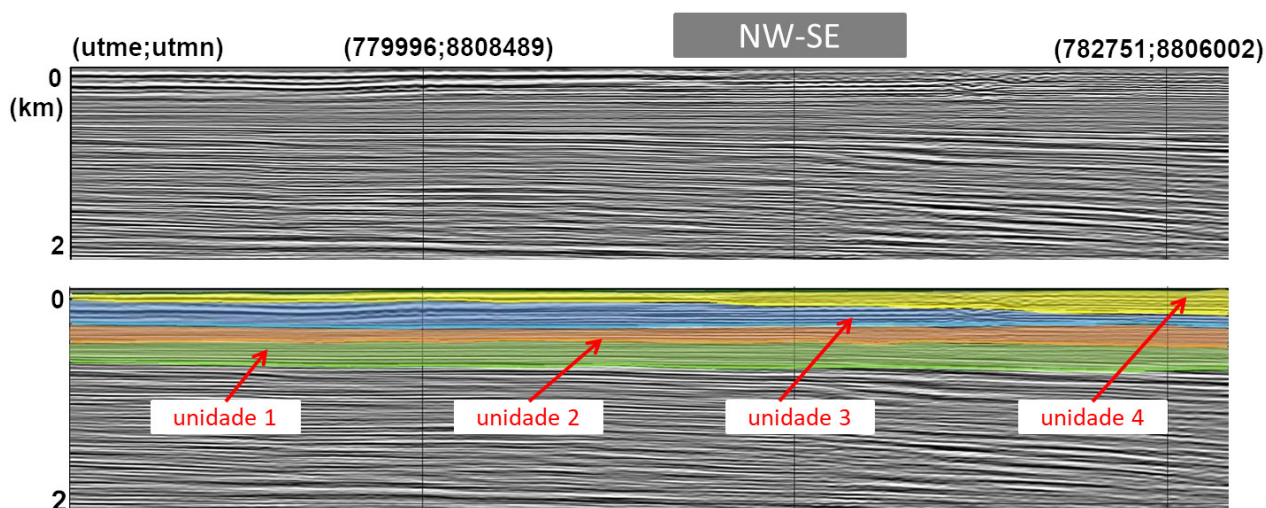


Figura 5. Seção sísmica 3 (*crossline*): não interpretado (figura superior) e interpretado (figura inferior). Localização: *crossline* 1 da Figura 2.

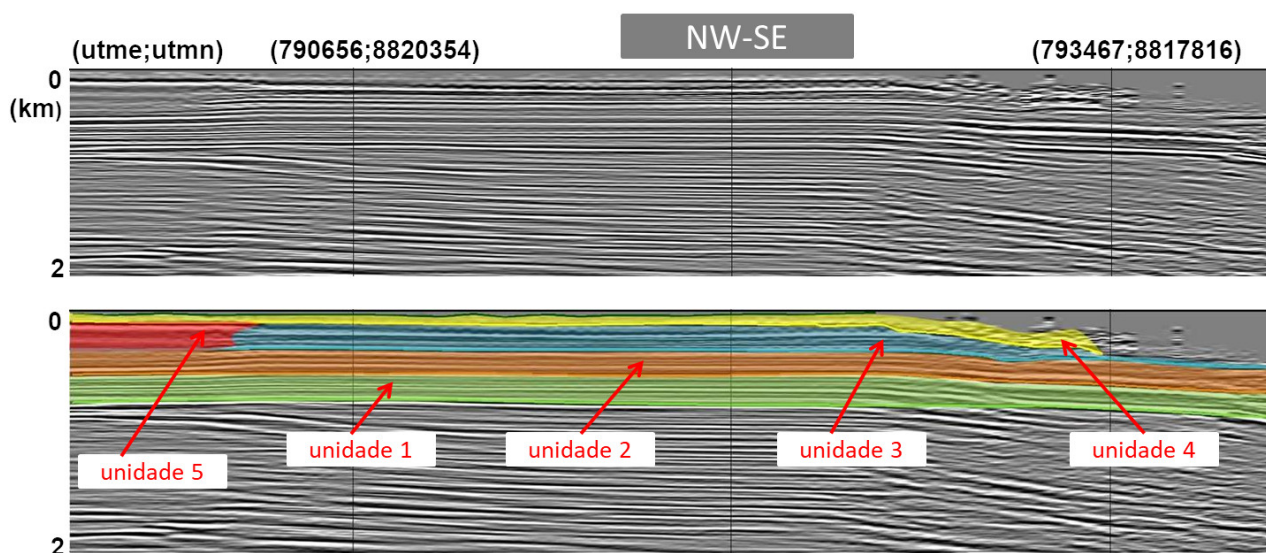


Figura 6. Seção sísmica 4 (*crossline*): não interpretado (figura superior) e interpretado (figura inferior). Localização: *crossline* 2 da Figura 2.

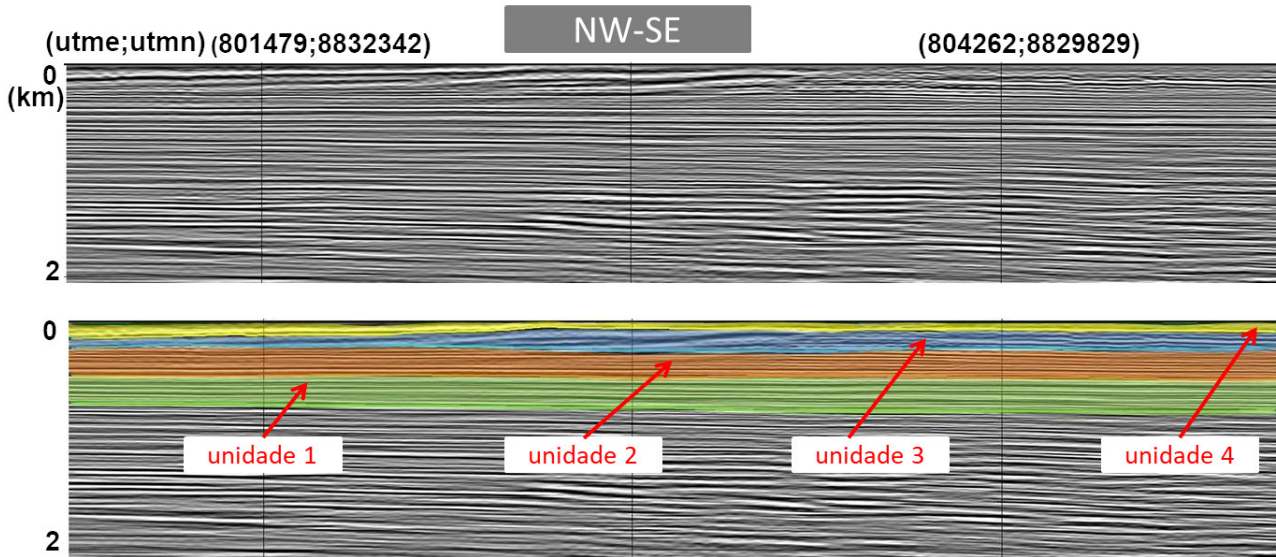


Figura 7. Seção sísmica 5 (*crossline*): não interpretado (figura superior) e interpretado (figura inferior). Localização: *crossline* 3 da Figura 2.

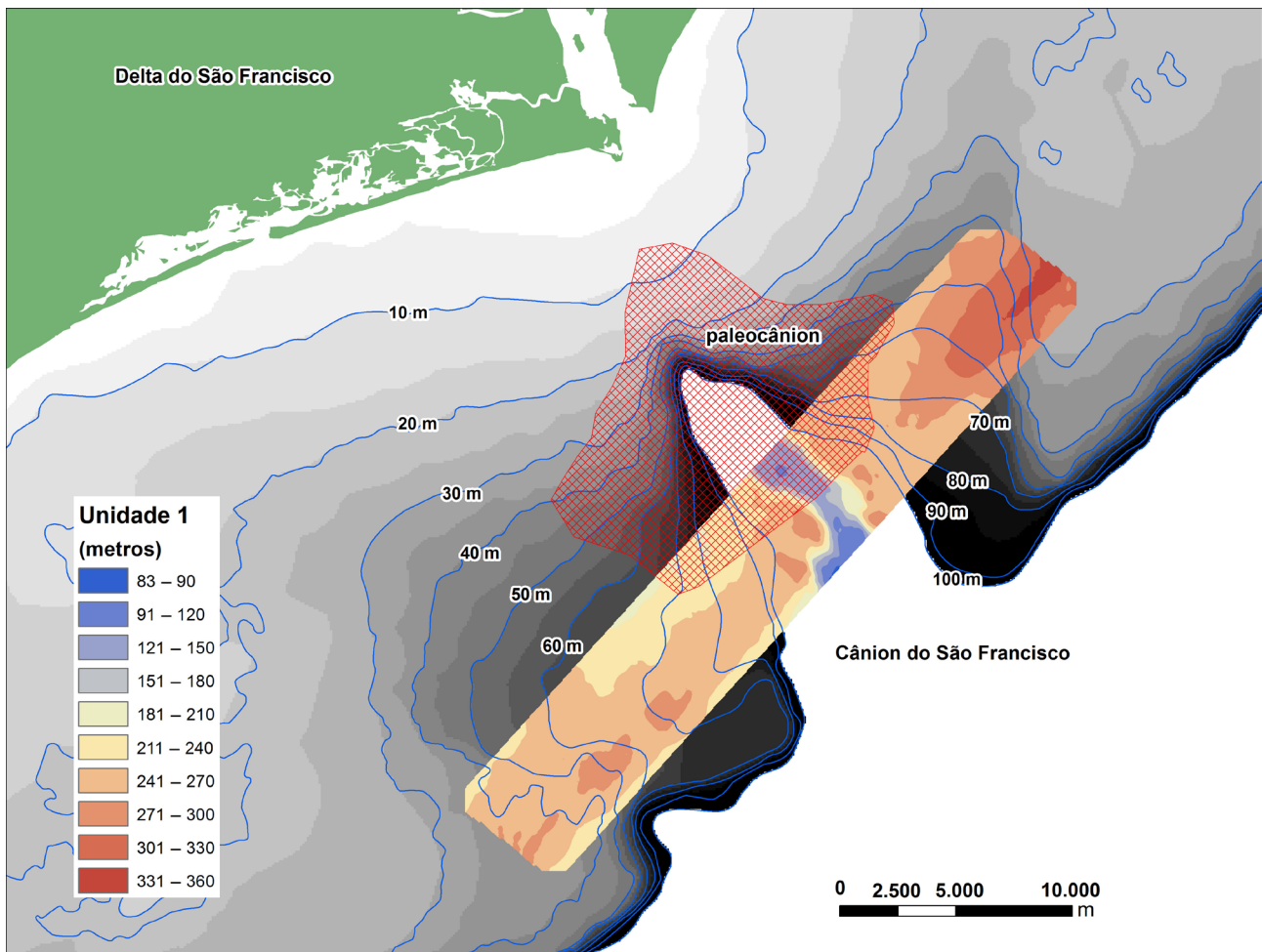


Figura 8. Isópacas da Unidade 1.

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 408 m. A extensão lateral dessa unidade aumenta no sentido do continente e seus limites coincidem aproximadamente com o paleocânion miocênico identificado por Cainelli (1992). Essa unidade representa, portanto, o preenchimento completo do paleocânion 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 paleocânion e do cânion atual, em razão de 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 às dos principais falhamentos presentes no arcabouço estrutural da bacia SEAL, implantados no Cretáceo. Essa possível herança e o controle estrutural existente na região serão discutidos em maior detalhe a seguir.

DISCUSSÃO

Segundo Melo et al. (1987), a principal fonte de sedimentos da plataforma continental de SEAL é o RSF. O delta desse rio progradiou cerca de 25 km.

A sedimentação na plataforma continental de SEAL integra o membro Marituba, da Formação Piaçabuçu da bacia SEAL (Cainelli, 1992). Este autor subdividiu a Formação Piaçabuçu em quatro principais seqüências deposicionais: seqüência do Cretáceo Superior, seqüência do Paleoceno, seqüência do Eoceno e seqüência 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 de 3 a 7), pertencem à seqüência Oligoceno-Quaternária. Essa afirmativa se baseia no tempo duplo em segundos (*two way travel time* — TWT) do limite inferior da seqüência Oligoceno-Quaternária identificada por Cainelli (1992) (entre 0,5 e 1 s).

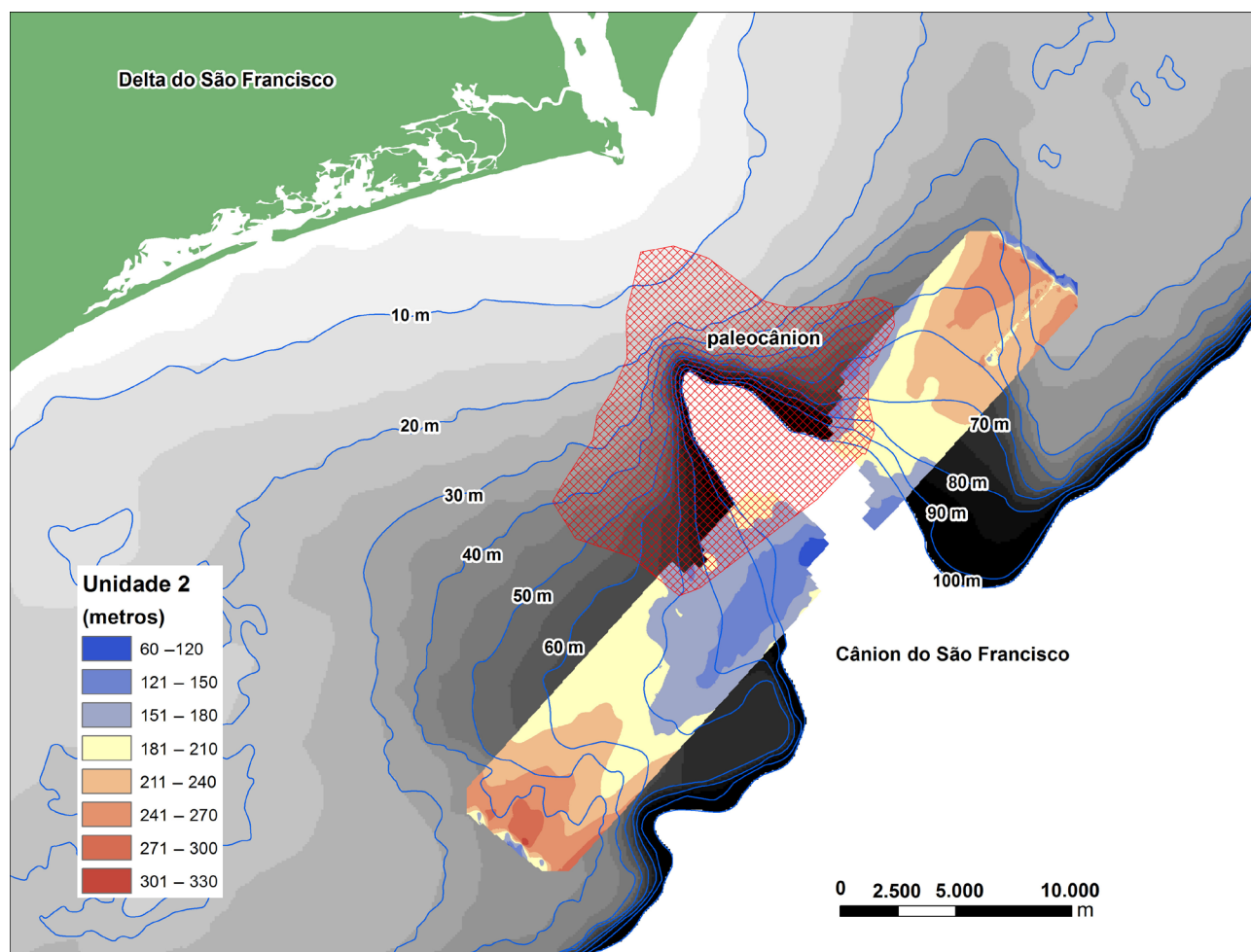


Figura 9. Isópacas da Unidade 2.

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 apresentando forte alinhamento com um falhamento sin-rifte da região (Falha de Piranhas), de direção principal NE-SW.

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

Como visto, as Unidades 3, 4 e 5, em razão das 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 clinoforma 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. Essas falhas seguem os mesmos alinhamentos das falhas do arcabouço estrutural da bacia SEAL (ver mapas de isópacas, Figuras de 10 a 12) e exercem um controle sobre a sedimentação moderna. Cainelli (1992), entretanto, não atribuiu uma causa tectônica para a implantação do CSF.

Potter e Szatmari (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. Essa 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 de 3 a 7).

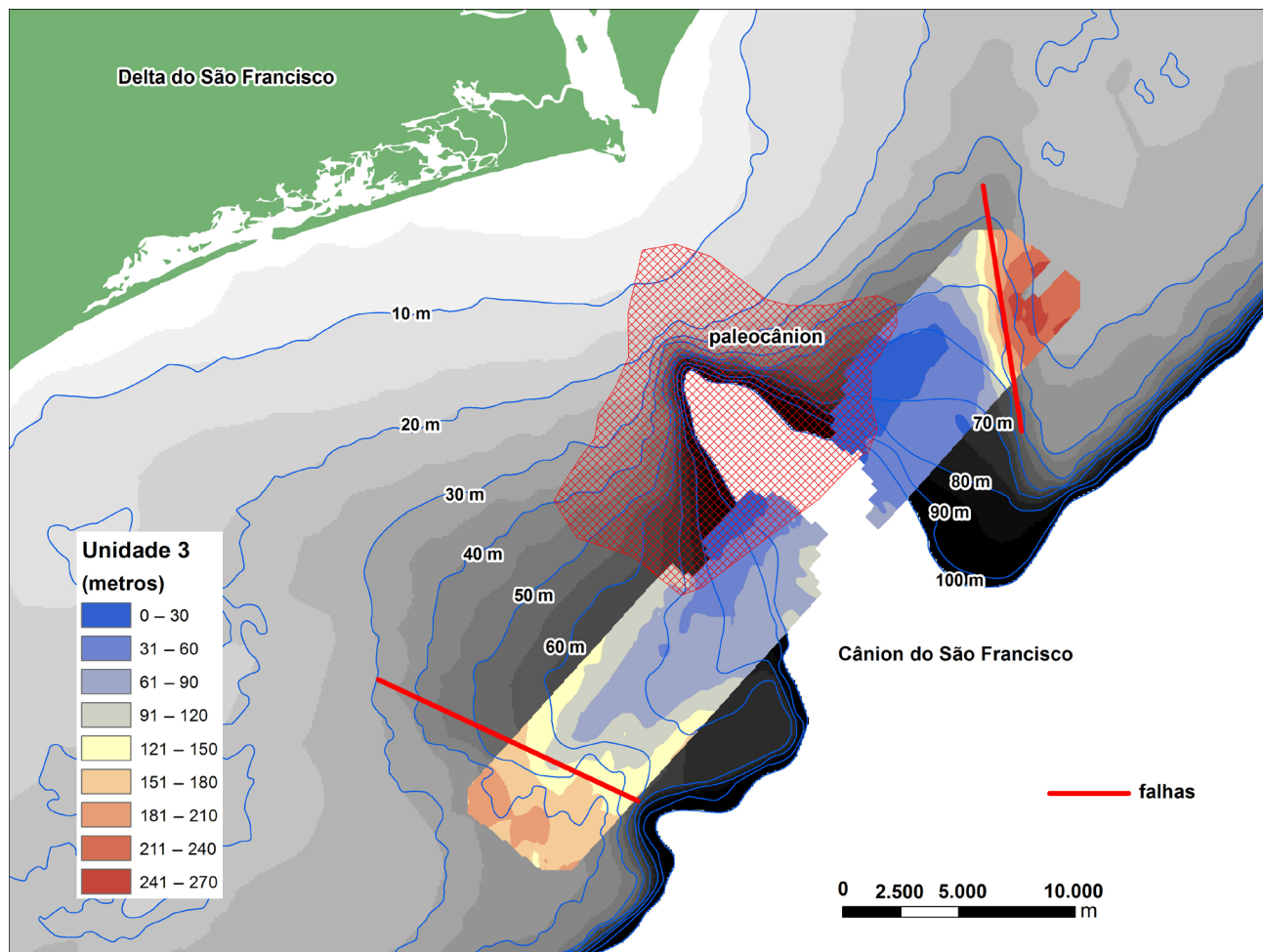


Figura 10. Isópacas da Unidade 3.

Com base nesses pressupostos, poderíamos, ainda que não dispnhamos de dados cronológicos, propor a seguinte sequência de eventos, descritos a seguir.

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. Essa 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, esse nível de mar alto deixou como testemunho a Formação Barreiras (Rossetti e Góes, 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 essa reativação, teria se instalado o paleocânion do São Francisco, de idade Pós-miocênica (Cainelli, 1992), que foi, mais tarde, 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 àquela presente na Unidade 1, porém com menor amplitude, sugerindo aumento de profundidade com consequente 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 importante contribuição lateral de sedimentos plataformais para o interior desse baixo topográfico e no sentido do continente, conforme já apontado.

Esses 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 DSF que progradam no sentido de costa-afora,

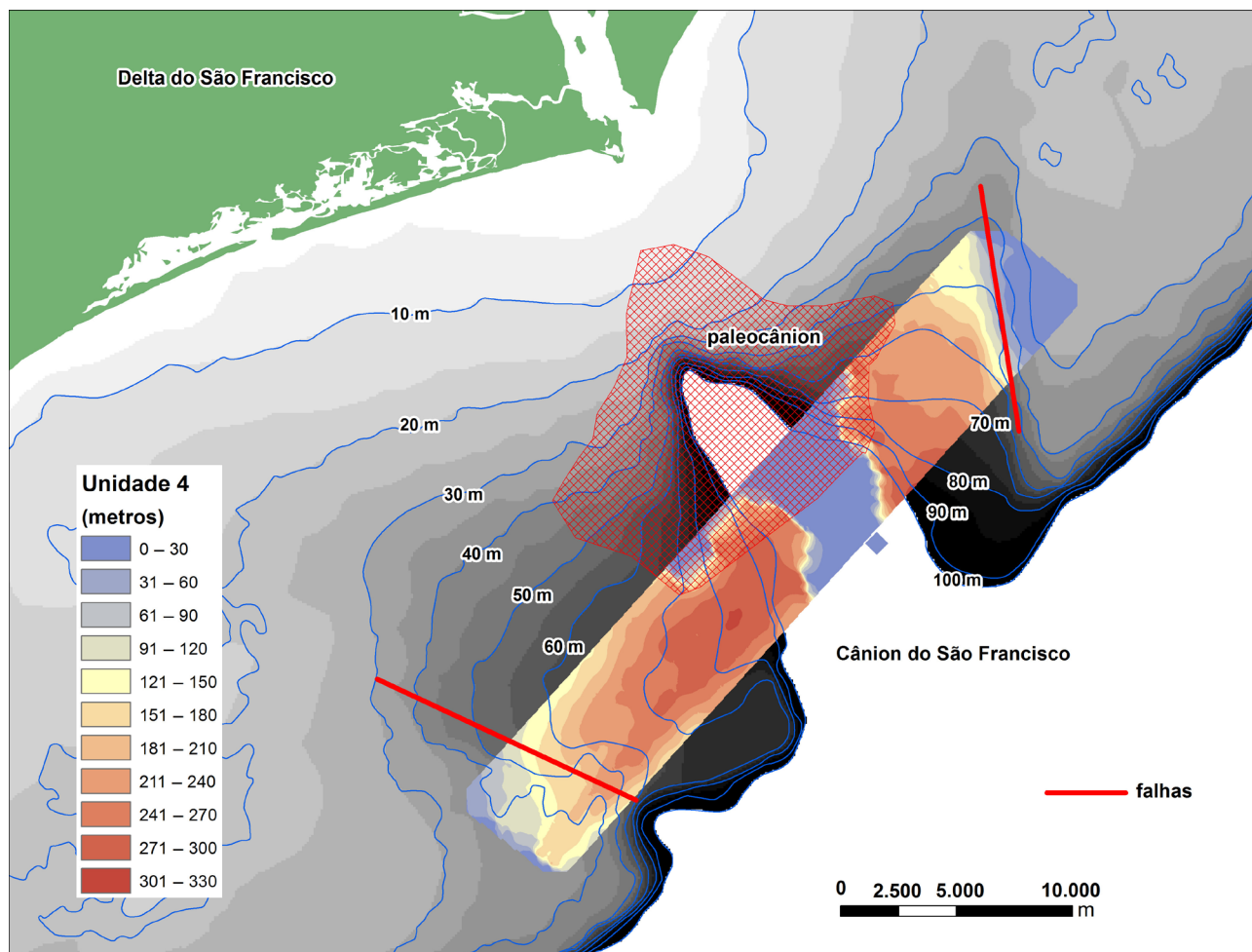


Figura 11. Isópacas da Unidade 4.

em “onlap” sobre os sedimentos da Unidade 3. A sedimentação da Unidade 4 apresenta, também, forte controle estrutural, como mostra o mapa de isópacas. Lima et al. (2014) sugerem mais dois eventos de reativação de falhas durante o Quaternário que, segundo eles, possibilitaram a deposição de sedimentos e a construção da morfologia do DSF como conhecemos hoje. É possível que a chegada desse 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 em razão das 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 da integração de dados sísmicos e geológicos, possíveis controles estruturais no

desenvolvimento do DSF. Foram individualizadas cinco 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. Esse 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. Esses sedimentos, de provável origem carbonática, foram sucedidos no tempo por um aporte maior de sedimentos siliciclásticos oriundos do RSF. Esse maior aporte de sedimentos para a região externa da plataforma estaria associado ao abaixamento do nível médio do mar associado às glaciações quaternárias. O aumento do aporte fluvial teria também favorecido a reativação do CSF.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Agência Nacional de Petróleo (ANP) a liberação de uso dos dados sísmicos 3D (projeto 0253_BAIIXO_SÃO_FRANCISCO_03) e aos

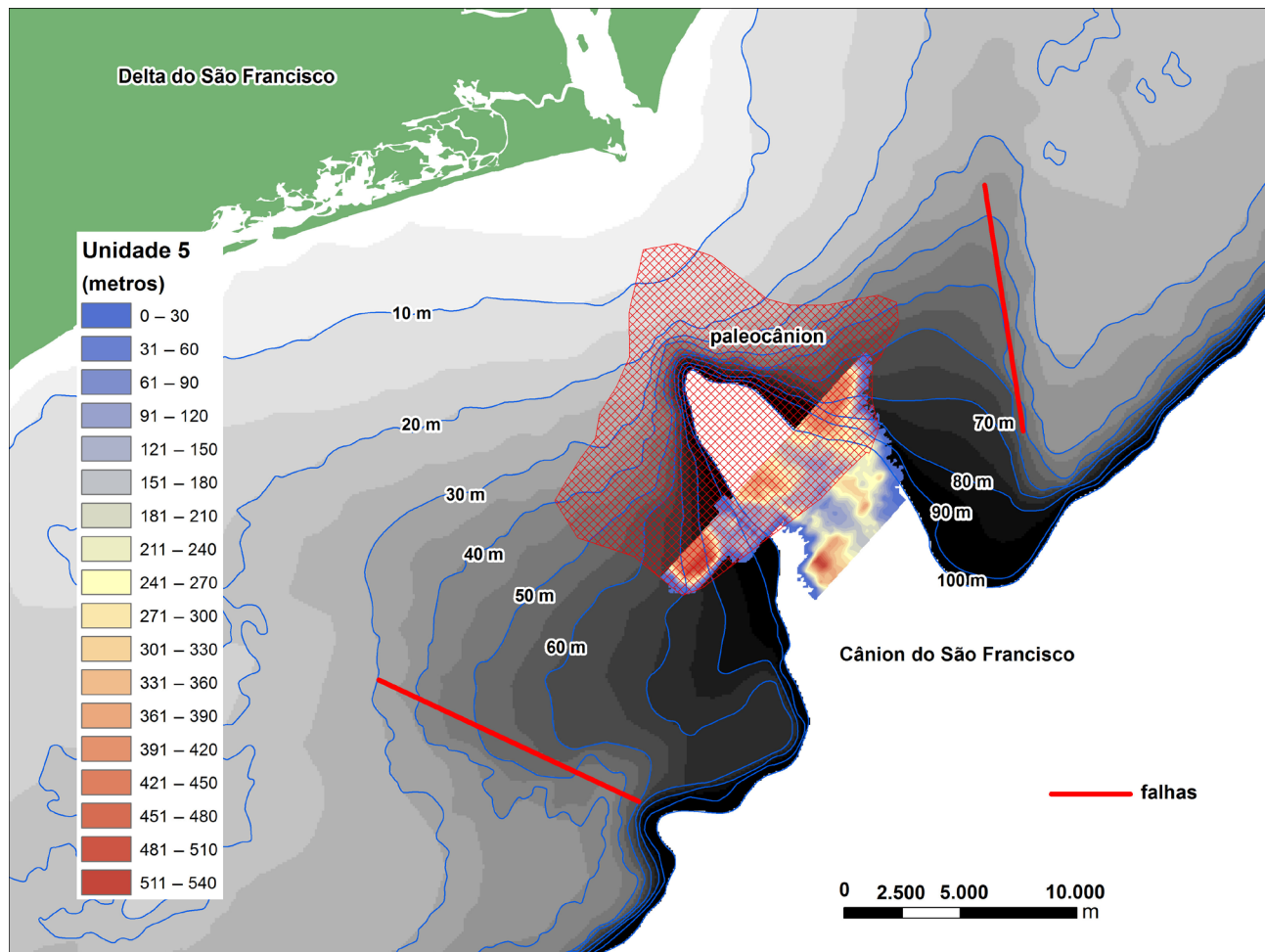


Figura 12. Isópacas da Unidade 5.

comentários de dois revisores anônimos. J. M. L. Dominguez agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) a Bolsa Pesquisador. A. A. dos Santos agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) a bolsa de Mestrado. Este trabalho é uma contribuição dos seguintes auxílios à pesquisa: CAPES/PNPD (nº 2983/2010), inctAmbTropic (CNPq/FAPESB nº 565054/2010-4, 8936/2011 e 465634/2014-1).

REFERÊNCIAS

- Aquino, G. S., Lana, M. C. (1990). Exploração na Bacia de Sergipe-Alagoas: o “estado da arte”. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, 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, 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2013.06.010>
- 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(4), 443-456. <https://doi.org/10.1002/esp.1040>
- Bhattacharya, J. P. (2006). Deltas. In: H. W. Posamentier (ed.). *Facies Models Revisited* (237-292). Society for Sedimentary Geology. <https://doi.org/10.2110/pec.06.84.0237>
- Bhattacharya, J. P., Giosan, L. (2003). Wave-influenced deltas: geomorphological implications for facies reconstruction. *Sedimentology*, 50(1), 187-210. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00545.x>
- Bhattacharya, J. P., Walker, R. G., James, N. P. (1992). *Facies Models* - Response to sea level change. Toronto. Geological Association of Canada. p. 157-178. <https://doi.org/10.1002/gj.3350290317>
- 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), 930-938. <https://doi.org/10.2112/05-0600.1>
- Cainelli, C. (1992). *Sequence stratigraphy, canyons, and gravity mass flow deposits in the Piaçabuçu Formation, Sergipe-Alagoas Basin, Brazil*. 233 f. Tese (Doutorado). Austin: The University of Texas.
- Cainelli, C. (1994). Shelf processes and canyon/channel evolution controlling turbidite systems. Exemplos from the Sergipe-Alagoas Basin, Brazil. In: 15th Research Conference da Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Gulf Coast Section, Houston, p. 39-50. *Proceedings...* Houston: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. <https://doi.org/10.5724/gcs.94.15.0053>
- Cainelli, C., Mohriak, W. U. (1998). Geology of Atlantic Eastern Brazilian basins. *AAPG, International Conference & Exhibition Short Course – Brazilian Geology Part II*. Rio de Janeiro, 67 p.
- Cainelli, C., Mohriak, W. U. (1999). Some remarks on the evolution of sedimentary basins along the Eastern Brazilian continental margin. *Episodes*, 22(3), 206-216.
- Carminati, E., Martinelli, G., 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*, 4(10), 1-14. <https://doi.org/10.1029/2002GC000481>
- Coleman, J. M., Wright, L. D. (1975). Modern river deltas: variability of processes and sand bodies. In: M. L. Broussard (ed.). *Deltas, models for exploration* (99-149). Houston: Geological Society.
- Coutinho, P. N. (1976). *Geologia marinha da Plataforma Continental Alagoas-Sergipe*. 119 f. Tese (Livre-Docência). Recife: Universidade Federal de Pernambuco.
- 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), 352-361. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1990352361>
- Dominguez, J. M. L. (1996). The São Francisco strandplain: a paradigm for wave-dominated deltas. *Geological Society Special Publication*, 117(1), 217-231. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.117.01.13>
- 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), 98-105. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.198313298105>
- Falkenheim, F. U. H., Fernandes, G., Cainelli, J. A. (1986). Análise da Bacia de Sergipe-Alagoas. Relatório Interno. Rio de Janeiro, Depex/Sedoc/Petrobras, 220p.

- Fontes, L. C., Kowsmann, R. O., Puga-Bernabéu, A. (2017). *Caracterização Ambiental da Bacia Sergipe e sul de Alagoas*. São Cristóvão: Editora UFS.
- Galloway, W. E. (1975). Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. In: M. L. Broussard (ed.). *Deltas, models for exploration*. Houston: Houston Geological Society, p. 87-98.
- Goodbred Jr., S. L., Kuehl, S. A., Steckler, M. S., Sarker, M. H. (2003). Controls on facies distribution and stratigraphic preservation in the Ganges-Brahmaputra delta sequence: *Sedimentary Geology*, 155(3-4), 301-316. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(02\)00184-7](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(02)00184-7)
- Guimarães, J. K. (2010). *Evolução do delta do rio São Francisco – estratigrafia do Quaternário e relações morfodinâmicas*. Tese (Doutorado). Salvador: Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 127 p.
- Lana, M. C. (1985). *Rifreamento na Bacia de Sergipe-Alagoas, Brasil*. Dissertação (Mestrado). Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 124p.
- Lima, C. U., Bezerra, H. R., Nogueira, C. C., Maia, R. P., Sousa, O. L. (2014). Quaternary fault control on the coastal sedimentation and morphology of the São Francisco coastal plain, Brazil. *Tectonophysics*, 633, 98-114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2014.06.026>
- 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*: Petrobras internal Report. Rio de Janeiro: Petrobras.
- Milliman, J. D., Summerhayes, C. P., Barretto, H. T. (1975). Quaternary sedimentation on the Amazon continental margin: model. *Geological Society of America Bulletin*, 86(5), 610-614. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1975\)86<610:QSO TAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1975)86<610:QSO TAC>2.0.CO;2)
- Mitchum Jr., R. M., 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: C. E. Payton (ed.). *Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration*. *American Association of Petroleum Geologists - Memoir*, Special Volumes, 26, 53-62.
- Ojeda, H. A. O. (1988). *Curso de Sismoestratigrafia (Notas Preliminares)*. Rio de Janeiro: Petrobras/Sedes, 236 p. (Apostila).
- Ojeda, H. A. O., Fugita, A. M. (1974). Bacia de Sergipe/Alagoas: Geologia Regional e perspectivas petrolíferas. *XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia*, Anais, 1, 136-158. Porto Alegre: SBG.
- Ponte, F. C. (1969). Estudo Morfoestrutural da Bacia Alagoas-Sergipe. *Boletim Técnico da Petrobras*, 12(4), 439-474.
- Potter, P. E., Szatmari, P. (2009). Global Miocene tectonics and the modern world. *Earth Science Reviews*, 96(4), 279-295. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.07.003>
- 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). Salvador: Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 48 p.
- Ribeiro, H. J. P. (2000). *Estratigrafia de Sequências: Fundamentos e Aplicações*. São Leopoldo: Edusinos, 428 p.
- Ribeiro, R. F. (2016). *Geomorfologia do Cânion do São Francisco e do Talude Adjacente, com Base em Dados de Batimetria Multifeixe*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia). Salvador: Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 44p. Disponível em: <<http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/27674>>. Acesso em: 10 out. 2018.
- Rossetti, D. F., Góes, A. M. (2009). Marine influence in the Barreiras Formation, State of Alagoas, Northeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 81(4), 741-755. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652009000400012>
- Sanchez-Arcilla, A., Jimenez, 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. (1977). Seismic stratigraphy and global changes in sea level, part 9: Seismic interpretation of clastic depositional facies. In: C. E. Payton (ed.). *Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon*. Exploration (26, 165-184). Tulsa: AAPG.
- Silva, I. R. (2008). Ambientes Costeiros. In: A. J. C. L. P. Silva, M. A. N. F. Aragão, A. J. C. Magalhães (eds.) *Ambientes de Sedimentação Siliclástica do Brasil* (212-223). São Paulo.
- Souza-Lima, W. (2006). Litoestratigrafia e evolução tectono-sedimentar da bacia de Sergipe-Alagoas, introdução. *Fundação Paleontológica Phoenix*, 8(89).
- Stanley, D. J. (1988). Subsidence in the northeastern Nile delta: Rapid rates, possible causes, and consequences. *Science*, 240(4851), 497-500. <https://doi.org/10.1126/science.240.4851.497>