



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
Área de Concentração: Geologia Marinha, Costeira e Sedimentar

NARAYANA FLORA COSTA ESCOBAR

**ORIGEM DA MATÉRIA ORGÂNICA NA
CLINOFORMA DELTAICA DO RIO SÃO
FRANCISCO E O IMPACTO DOS GRANDES
BARRAMENTOS**

Salvador
2019

NARAYANA FLORA COSTA ESCOBAR

**ORIGEM DA MATÉRIA ORGÂNICA NA
CLINOFORMA DELTAICA DO RIO SÃO
FRANCISCO E O IMPACTO DOS GRANDES
BARRAMENTOS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Doutora em Geologia, Área de concentração: Geologia Marinha, Costeira e Sedimentar.

Orientador: Prof. José Maria Landim Dominguez

Salvador
2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Escobar, Narayana Flora Costa
Origem da matéria orgânica na clinoforma deltaica
do rio São Francisco e o impacto dos grandes
barramentos / Narayana Flora Costa Escobar. --
Salvador, 2019.
88 f. : il

Orientador: José Maria Landim Dominguez.
Tese (Doutorado - Pós-Graduação em Geologia) --
Universidade Federal da Bahia, Instituto de
Geociências, 2019.


1. Clinoformas deltaicas. 2. Isótopos estáveis. 3.
Matéria orgânica. 4. Sedimentação episódica. 5.
Barragens. I. Dominguez, José Maria Landim. II.
Título.

NARAYANA FLORA COSTA ESCOBAR


**“ORIGEM DA MATÉRIA ORGÂNICA NA CLINOFORMA
DELTAICA DO RIO SÃO FRANCISCO E O IMPACTO DOS
GRANDES BARRAMENTOS”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Geologia da Universidade
Federal da Bahia, como requisito para a
obtenção do Grau de Doutora em
Geologia, defendida em 13/05/2019.


TESE APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:



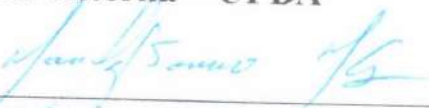
Dr. José Maria Landim Dominguez
Orientador - UFBA



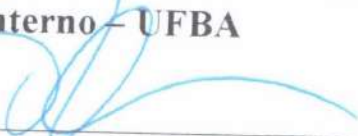
Dr. Ícaro Thiago de Andrade Moreira
Examinador Externo – UNIFACS



Dra. Junia Kacenenbogen Guimarães
Examinadora Externa – UFBA



Dr. Manoel Jerônimo Moreira Cruz
Examinador Interno – UFBA



Dra. Olivia Maria Cordeiro de Oliveira
Examinadora Interna - UFBA

Salvador – BA
2019

"... Os homens perdem a saúde para juntar dinheiro, depois perdem o dinheiro para recuperar a saúde. E por pensarem ansiosamente no futuro, esquecem do presente de forma que acabam por não viver nem no presente nem no futuro. Vivem como se nunca fosse morrer e morrem como se nunca tivesse vivido"

Dalai Lama

Dedico este trabalho, *in memoriam*, ao meu pai, José Arturo Escobar, pelo apoio e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a José Maria Landim Dominguez, não apenas pela brilhante orientação, mas pela amizade e confiança conquistada ao longo deste período, pela paciência e pelas discussões homéricas, pelos conselhos e por toda ajuda emocional, foram essenciais para que aqui chegasse. Agradeço também aos demais professores do programa, que dedicaram seu tempo e conhecimento para minha formação como pesquisadora.

Agradeço a todos os colegas do Laboratório de Estudos Costeiros, por tornarem o trabalho do dia-a-dia mais leve e divertido, especialmente: Isaac, Adriane Rangel (Didica), Rafael, Renato (Gema), Marcela, Junia Kacenenbogen e Juliana Bernal (Ju).

Agradeço ao Laboratório de Estudos do Petróleo-LEPETRO e todos os técnicos envolvidos, pelas análises e competência.

Agradeço imensamente aos meus amigos da vida, que sempre me apoiaram e estiveram nos momentos bons e ruins de todas as etapas deste trabalho, tornando a minha vida repleta de bons momentos e de boas lembranças, especialmente: a Carine, Hortência e Milena (Mila), pelo apoio nos momentos mais difíceis; a Faleta, Dayane, Mara, Xarope e Rivaldo, pelos momentos de descontração, risadas e longas conversas. Aos meus amigos de sempre, que mesmo na distância torcem pelo meu sucesso onde quer que esteja: Gabriel Cotrim, Manuel Cezar (Pumba), Joaquim Lessa (Quinze) e Felipe Orge (Garotinho).

Agradeço à minha família, minha mãe, Zulmira, meus irmãos, Arturinho, Indra, Surya e Arjuna, pelo apoio constante e por serem o alicerce de minha vida.

Agradeço carinhosamente ao meu esposo, Rodrigo, pelo amor, carinho e incentivo constante.

E por fim, a todos que direta e indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

O rio São Francisco (RSF) é um dos rios mais importantes do Brasil. O delta dominado por ondas em sua foz inclui uma clinofoma lamosa bem desenvolvido na plataforma adjacente. Este estudo objetivou compreender a distribuição de matéria orgânica sedimentar (MO) e a contribuição relativa de suas fontes no sedimentos superficial, e compreender a expressão sedimentar de ciclos climáticos recentes e possíveis efeitos das intervenções antrópicas na bacia hidrográfica. Com isso, foram desenvolvidos dois artigos. O primeiro trata da caracterização dos sedimentos superficiais da clinofoma deltaica do São Francisco (SF), a partir de uma grade de amostragem densa e uniformemente distribuída, no qual foram analisados os seguintes parâmetros nos sedimentos: tamanho de grão, carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), carbonatos e razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}$). A distribuição espacial da MO mostrou uma correlação muito boa com as várias províncias sedimentares do clinofoma (topset, foreset e bottom set) e as contribuições laterais dos sedimentos de fundo dos recifes vizinhos, advindos dos fluxos costeiros. A melhor indicação de influência do rio foi fornecido pelo $\delta^{13}\text{C}$, refletindo o padrão de retração das plumas de rios observado nas últimas décadas, caracterizado por baixas descargas, em comparação com valores históricos. Ressalta-se a importância de estudos de referência, com base em uma grade de amostragem densa e uniformemente espaçadas e sua integração com dados locais. O segundo artigo fez uso de dois testemunhos rasos coletados na clinofoma deltaica do RSF, localizados a nordeste (ST6) e a sudoeste (ST4) de sua foz, na profundidade de 20 m. Um estudo multi-parâmetro foi realizado, incluindo tamanho do grão, COT, NT, $\delta^{13}\text{C}$, análise elementar Ti/Ca e Fe/Ca, além da aquisição de linhas sísmicas rasas de alta resolução transversais à costa. O caráter da sedimentação deltaica mostrou-se essencialmente episódico, acompanhando o comportamento sazonal da precipitação na bacia de drenagem. Os resultados mostraram que os períodos de maior suprimento de sedimento para a plataforma eram controlados por eventos de cheia do RSF. Contudo, o testemunho ST6 reflete melhor estas grandes cheias do rio, enquanto o furo ST4 mostra um comportamento mais uniforme, ligada a influência mais continuada da pluma fluvial. Os registros sísmicos mostraram as mesmas unidades sismoestratigráficas em ambos os testemunhos. A base e o topo apresentam um caráter mais retrogradacional, típico de um menor aporte sedimentar. Ao passo que as três unidades intermediárias apresentam caráter

progradacional. Em ambos os testemunhos o aumento do teor de finos em direção ao topo acompanhada dos baixos teores da razão Fe/Ca e Ti/Ca são interpretados como consequência da brusca regularização da vazão do RSF a partir de 1986, pela instalação de barramentos e em função da diminuição da precipitação na bacia de drenagem.

Palavras-chave: Clinofoma deltaica; Rio São Francisco; Matéria orgânica; Isótopos estáveis; Sedimentação episódica.

ABSTRACT

The São Francisco River (SFR) is one of the most important rivers in Brazil. The wave-dominated delta at its mouth includes a well developed muddy clinoform on the adjacent platform. This study aimed to understand the sedimentary organic matter distribution (OM) and the relative contribution of its sources to the surface sediments, and to understand the sedimentary expression of recent climatic cycles and possible effects of anthropogenic interventions in the watershed. Two articles were developed. The first one deals with the characterization of the superficial sediments of the San Francisco deltaic clinoform (SF), collected in dense and evenly distributed sampling grid, in which the following parameters were analyzed in the sediments: grain size, total organic carbon (TOC), total nitrogen (NT), carbonates and carbon isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}$) of OM. The spatial distribution of the OM showed a very good correlation with the various sedimentary clinoform provinces (topset, foreset and bottom set) and the lateral contributions of the bottom sediments of the neighboring reefs by the coastal flows. The best indication of river influence was provided by $\delta^{13}\text{C}$, reflecting the pattern of retraction of river plumes observed in the last decades, characterized by low discharges, in comparison with historical values. The importance of reference studies, based on a dense and uniformly spaced sampling grid and its integration with local data, is emphasized. The second article made use of two shallow cores collected in the deltaic SFR clinoform, located to the northeast (ST6) and southwest (ST4) of its mouth in the depth of 20 m. A multi-parameter study was carried out, including grain size, TOC, NT, $\delta^{13}\text{C}$, elemental Ti/Ca and Fe/Ca analysis, as well as the acquisition of shallow high-resolution seismic lines transverse to the coast. The character of the deltaic sedimentation showed to be essentially episodic, following the seasonal behavior of the precipitation in the drainage basin. The results showed that the periods of higher sediment supply to the platform were controlled by SFR flood events. However, the core ST6 better reflects these large river floods while the ST4 shows a more uniform behavior, linked to the more continuous influence of the river plume. Seismic records showed the same seismostratigraphic units in both samples. The base and top have a more retrogradational character, typical of a lower sedimentary input, while three intermediate units have a progradational character. In both cases the increase in the content of silt and clay towards the top of the cores accompanied by low Fe/Ca and Ti/Ca ratios are interpreted as consequences of the sudden

regularization of the SFR flow since 1986 due to the installation of dams and the decrease in precipitation on the SFR watershed.

Keywords: Deltaic clinoform; São Francisco River; Organic Matter; Stable isotopes; episodic sedimentation; Sedimentação Episódica.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL.....	12
CAPÍTULO 2: ARTIGO 1- SOURCES AND DISTRIBUTION OF ORGANIC MATTER IN A DELTAIC CLINOFORM: THE CASE OF THE SÃO FRANCISCO RIVER (NE BRAZIL).....	15
1 INTRODUCTION	17
2 REGIONAL SETTING	19
2.1 The São Francisco Watershed	19
2.2 The Clinoform and Continental Shelf	21
2.3 Regional Oceanographic Aspects	22
3 MATERIAL AND METHODS	25
4 RESULTS	26
4.1 Grain Size	26
4.2 Calcium Carbonate (CaCO₃)	27
4.3 Total Organic Carbon and Total Nitrogen	28
4.4 Carbon Stable Isotopes	30
4.5 Total Organic Carbon/Total Nitrogen ratio (C/N)	32
5 DISCUSSION	33
5.1 Sources of organic matter to the study area	33
5.2. Organic Matter Origin	34
6 CONCLUSIONS	40
7 REFERENCES	42
Supporting Information	54
CAPÍTULO 3: ARTIGO 3: SEDIMENTAÇÃO RECENTE NA CLINOFORMA DELTAICA DO RIO SÃO FRANCISCO: POSSÍVEL EFEITO DOS BARRAMENTOS	59
1 INTRODUÇÃO	60

2 CONFIGURAÇÃO REGIONAL	62
2.1 Clima, Regime Hidrológico e Dispersão de Sedimentos.....	62
2.2 A Clinoforma deltaica	63
3 MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1 Coleta de testemunhos	64
3.2 Análises geoquímicas	65
3.3 Datações	65
4 RESULTADOS	67
4.1 Perfis sísmicos	67
4.2 Textura do sedimento	67
4.3 Análises geoquímicas	71
4.4 Cronologia	71
5 DISCUSSÃO	73
6 CONCLUSÃO	78
7 REFERÊNCIAS	78
CAPÍTULO 4: CONCLUSÃO GERAL	87

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

As clinofórmulas deltaicas são reconhecidas por serem repositórios naturais das mudanças ambientais na bacia hidrográfica (Syvitski, 2003; Bhianchi et al., 2009; Nittrouer et al., 2009). Em função de apresentar normalmente altas taxas de sedimentação, permite que a preservação do registro estratigráfico forneça importantes informações para reconstituir condições ambientais pretéritas (Mendes et al., 2010; Mendes et al., 2015). Desta forma, são áreas estratégicas para investigar a relação entre os processos oceânicos e as mudanças ambientais continentais (Syvitski, 2003; Bhianchi et al., 2009; Nittrouer et al., 2009; Mendes et al., 2010; Mendes et al., 2015).

Os rios são o principal condutor de sedimento e material orgânico entre o continente e o oceano (Milliman, 1983). A quantidade de material transportado varia, principalmente, em função das características da bacia de drenagem e das condições climáticas (quantidade de chuvas) ao longo da mesma (Bauer et al., 2013). No entanto, nas últimas décadas, alterações antrópicas como desmatamento e represamento dos rios têm afetado o transporte de material para estas regiões (Syvitski, 2008).

A implantação de barragens em sistemas fluviais representa um impacto ambiental significativo sobre a zona costeira e sobre a plataforma continental adjacente aos seus exutórios. Os principais impactos estão relacionados à retenção e transformação de material e a modificação natural do fluxo de água e material associado (Vörösmarty et al., 2003; Syvitski et al., 2005; Syvitski, 2008). Estas mudanças influenciam no aumento da erosão costeira e na redução do aporte de

nutrientes e matéria orgânica para as águas costeiras e plataformais com impactos diretos na produtividade marinha (Dominguez et al., 2003; Bittencourt et al., 2007; Medeiros et al., 2011).

O rio São Francisco (RSF), um dos maiores rios da América do Sul, construiu durante o Holoceno um delta dominado por ondas que apresenta uma clinofoma deltaica bem desenvolvida em sua porção submersa (Guimarães, 2010; Rangel e Dominguez, 2015; Rangel e Dominguez, 2019), e está sujeito a uma forte sazonalidade climática, com alternância de períodos secos e úmidos. Durante as décadas de 50 e 90 do século passado, diversas barragens foram instaladas ao longo de seu médio e médio-baixo curso. Segundo alguns autores, a bacia já sofre com alterações na região estuarina, na planície deltaica e na linha de costa decorrentes da construção destes barramentos (Marques et al., 2004; Knoppers et al., 2006). No entanto, poucos estudos investigaram os efeitos destas intervenções sobre a clinofoma deltaica submersa.

A matéria orgânica sedimentar depositada em regiões deltaicas fornece uma variedade de indicadores (*proxies*), que podem ser utilizados para reconstrução de paleoambientes e paleoclimas continentais e marinhos. A determinação dos teores e das razões entre os elementos que compõem a matéria orgânica tais como o carbono e o nitrogênio, oferecem suporte para a compreensão da sua natureza, origem e grau de degradação. Além disso, por meio da composição isotópica da matéria orgânica, é possível obter informações a respeito dos ecossistemas e ambientes pretéritos nos quais a matéria orgânica foi criada e depositada (Meyers, 1994; Meyers, 1994). No entanto, as assinaturas isotópicas da matéria orgânica dos sedimentos superficiais variam muito em regiões deltaicas de todo o mundo (Bhianchi et al., 2002; Garcia-Garcia et al., 2006; Kennicutt et al., 1986). Essas variações são atribuídas a diferentes

causas, incluindo tipo de vegetação das bacias hidrográficas, produtividade primária induzida pela pluma fluvial, remineralização, impactos antrópicos e circulação costeira (Bauer et al., 2013; Burdige, 2005, 2007; Hedges et al., 1997). Desta forma, a compreensão destes fatores locais são imprescindíveis para uma boa interpretação a cerca da origem da matéria orgânica na área de estudo.

O transporte de elementos principais em sedimentos marinho também têm sido largamente utilizados para rastrear mudanças na entrada de material terrígeno (por exemplo, Arz et al., 1998; Arz et al., 1999; Govin et al., 2012). Diversos proxies baseados em elementos principais foram desenvolvidos e usados para reconstruir e interpretar paleoclimas terrestres. O uso das razões Fe/Ca e Ti/Ca como proxies do aporte terrestre é baseado na premissa de que, como um componente da calcita e a aragonita, o Cálcio (Ca) reflete o conteúdo carbonático marinho no sedimento. Por sua vez, o Titânio (Ti) e o Ferro (Fe) estão relacionados aos componentes siliciclásticos e aos minerais essencialmente argilosos (Arz et al., 1998). Portanto, variações nos teores de Fe e Ti representam um proxy químico da contribuição de material terrestre, proporcionando uma medida da precipitação e do *runoff* continental nos oceanos (Govin et al., 2012).

A integração dos *proxies* relacionados com outras informações sedimentológicas, tais como a textura, as taxas de sedimentação e sua distribuição espaço-temporal permite uma melhor compreensão das mudanças ambientais, relacionadas às intervenções humanas e ao clima (Lamb et al., 2006). Com isso, o objetivo deste trabalho foi caracterizar a origem e o destino final da matéria orgânica nos sedimentos superficiais da clinofoma deltaica e investigar o efeito da construção dos grandes barramentos na sedimentação da clinofoma deltaica do RSF, a partir de testemunhos e linhas sísmicas rasas de alta resolução transversais à costa.

CAPÍTULO 2**ARTIGO 1**

Sumetido e aceito pela: Geo-Marine Letters

SOURCES AND DISTRIBUTION OF ORGANIC MATTER IN A DELTAIC**CLINOFORM: THE CASE OF THE SÃO FRANCISCO RIVER (NE BRAZIL)**

Narayana Flora Costa Escobar¹ – nara.flora@gmail.com

José Maria Landim Dominguez¹ – landim@ufba.br

Maria do Rosário Zucchi² - mrzucchi@ufba.br

Antônio Expedito Gomes de Azevedo² - expedito@ufba.br

Adriane Gonçalves de Araújo Nunes Rangel¹ - adriane_rangel@hotmail.com

Renata Cardia Rebouças³ - rcr.renata@gmail.com

¹ Geosciences Institute - UFBA, Graduate Program in Geology, Universidade Federal da Bahia, 40170-115 – Bahia - Brazil

² Physics Institute – UFBA, Universidade Federal da Bahia, 40170-115- Bahia - Brazil

³ Oceanography Department – UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 20550-103 - Rio de Janeiro – Brazil

ABSTRACT

The São Francisco river (SFR) is one of the most important rivers in Brazil. The wave-dominated delta at its mouth includes a well-developed muddy clinoform on the adjacent shelf. This study aimed to understand sedimentary organic matter (OM) distribution and the relative contribution of terrestrial/fluvial and marine sources. A dense and evenly distributed sampling grid was used to evaluate the contribution of

different OM sources and the influence of local factors. The following parameters were evaluated: grain size, total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), carbonates, and carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$). The spatial distribution of OM properties showed very good correlation with the various sedimentary provinces of the clinoform (topset, foreset and bottom set) and the lateral contributions of sediments from neighboring reef bottoms, advected by coastal flows. TOC and TN varied respectively between 0.11 % and 1.56 % and between 0.02 % and 0.20 %. The distribution of these parameters in combination with $\% \text{CaCO}_3$ shows that the major contributors of TOC to the study area are the São Francisco river, coastal reefs located northwards, and shelf reef bottoms located northeastwards and southwestwards from the deltaic clinoform. The best indicator of river influence was provided by $\delta^{13}\text{C}$, with values ranging between -23 ‰ and -19 ‰. The spatial distribution of $\delta^{13}\text{C}$ precisely mimics the various sedimentary elements of the clinoform, reflecting the pattern of river plume expansion observed during the last decades, which is characterized by low discharges, compared to historical values. Many studies in the literature, even using more sophisticated techniques, have frequently focused on sampling strategies using onshore-offshore transects without seeking integration with other local geologic and dynamic factors acting on a given study area. Here we have demonstrated the importance of reference studies, based on a dense and evenly spaced sampling grid and its integration with local geological, geomorphological and geophysical data to better understand the sources and origin of organic matter and its spatial distribution in deltaic settings. The São Francisco river is extremely important from a cultural, economic and energy generation perspective for the poorer northeastern portion of Brazil, and one of the most important and threatened rivers in the country because of human uses and climate changes.

Keywords: Deltaic clinoform; $\delta^{13}\text{C}$; Continental Shelf; São Francisco River; Organic Matter; Northeastern Brazilian coast.

1 INTRODUCTION

Delta clinoforms have long been recognized as natural archives of environmental changes occurring in the drainage basin and coastal sea (Bănaru et al., 2007; Bianchi and Allison, 2009; Raymond and Bauer, 2001). Moreover, because deltas provide large contributions of terrestrial organic matter to coastal seas they have always been considered one of the main carbon sequestering areas on continental shelves (Blair and Aller, 2012; Hedges et al., 1995; Seiter and Zabel, 2004).

Carbon and nitrogen concentrations and their isotopic signatures have been widely used to characterize sedimentary organic matter (OM) and reconstruct past environmental changes (Lamb et al., 2006; Meyers, 1994, 1997; Pancost and Pagani, 2006; Ramaswamy et al., 2008; Zhang et al., 2007). However, organic carbon isotopic signatures vary greatly worldwide in deltaic regions such as the Rhône, the Niger, the Orinoco, the Mississippi (Bianchi et al., 2002; Garcia-Garcia et al., 2006; Kennicutt et al., 1986), and in those deltas located in Brazil, such as the Paraíba do Sul (Carreira et al., 2015) and the Amazon (Ruttenberg and Goñi, 1997). These variations have been attributed to different causes including type of watershed vegetation, increased primary production induced by the fluvial plume, remineralization, human influences, and coastal ocean circulation (Bauer et al., 2013; Burdige, 2005, 2007; Hedges et al., 1997). This natural variability, resulting from intrinsic local factors, can compromise the quality of interpretations of past environmental changes using downcore variations in OM properties. Moreover, the quality of paleo-environmental reconstructions can be

greatly improved by using local reference conditions assessed *in situ* as opposed to comparisons with similar systems elsewhere (Benito et al., 2016).

The São Francisco (SF) is one of the most important rivers in Brazil (Fig. 1). It is extremely important from a cultural, economic and energy generation perspective for the poorer northeastern portion of the country. The SF watershed is considered one of the most vulnerable in Brazil to ongoing climate changes, suffering under a prognosis of decreasing rainfall over the next decades (Marengo et al., 2011). In its subaqueous portion, the SFR has built a mud clinoform measuring about 35 m in thickness (Araújo et al., 2018; Rangel, 2017) (Fig. 1). In order to unlock past environmental records preserved in this clinoform, particularly information on the sources and origin of OM in these sediments, we believe that an important aspect is to identify and know in detail the spatial distribution of isotopic signatures and C/N elemental ratios, and how these relate to local intrinsic characteristics such as sedimentary provinces and coastal ocean circulation. The traditional approach in this kind of study has been to collect data along onshore-offshore transects (Goñi et al., 1998; Medina et al., 2005). Such approach however, cannot capture subtle variations in OM properties that reflect relevant local environmental controls. Thus, the main objective of the present investigation was to conduct a reference study on the characteristics and environmental fate of organic matter present in bulk surface sediments of the SF delta clinoform, using a detailed and evenly distributed sampling grid (Fig. 1). In doing so we hope to develop a reference frame to be applied in future paleo-environmental reconstructions, using downcore changes of these parameters either isolated, or in combination with others that have been commonly used in recent years such as foraminifera, ^{14}C , sediment characteristics, biomarkers, metal ratios, among others (Carlin and Dellappena, 2014; Mendes et al., 2015; Zhou et al., 2016).

This research is part of a major ongoing effort to reconstruct paleo-environmental changes in the SF Delta (inctAmbTropic – Grant #565054/2010-4, 8936/201, 465634/2014-1) associated with both natural and human causes during the Late Holocene.

2 REGIONAL SETTING

2.1 The São Francisco Watershed

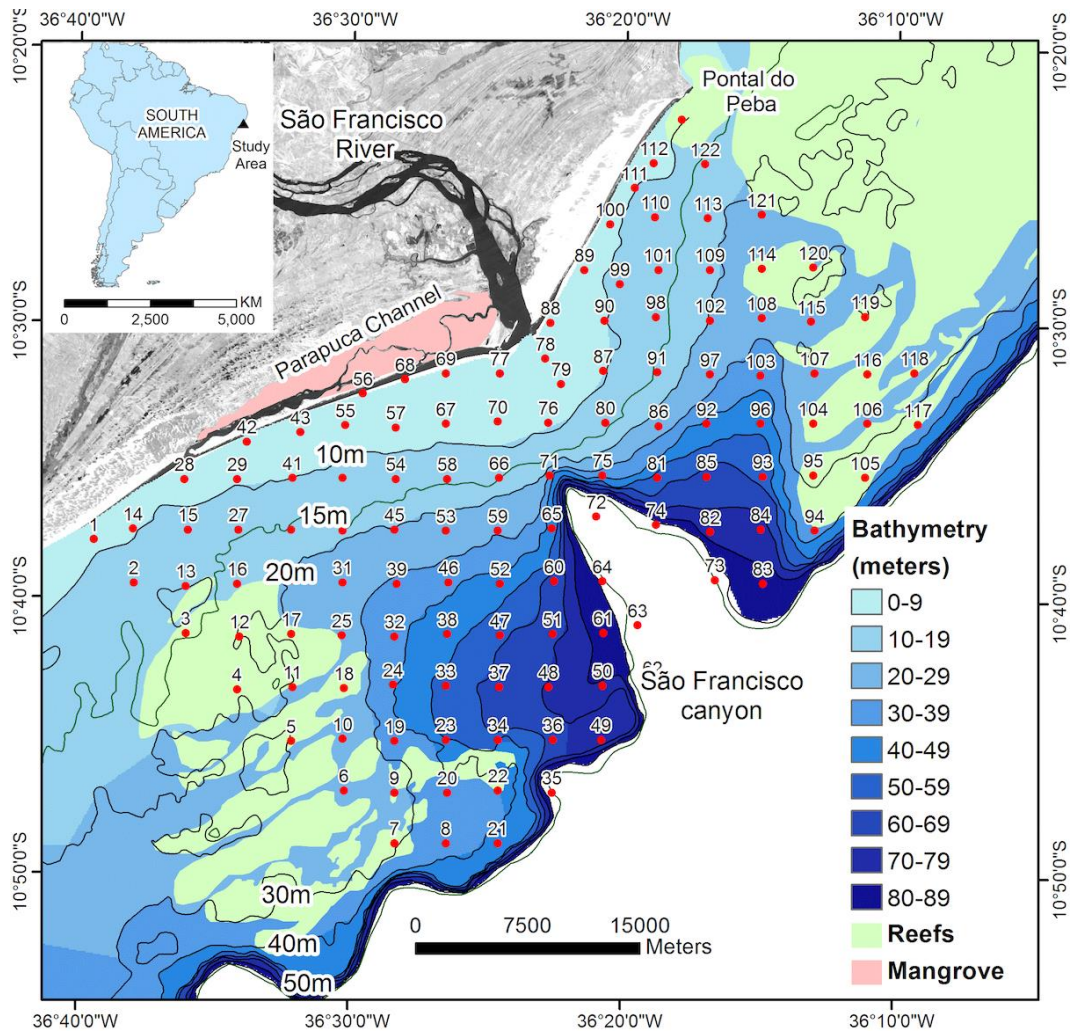
The SFR is part of the fourth largest watershed in Brazil. The headwater is located at an altitude of 1,428 m, bringing the total length of the river to 2,863 km, with a drainage area of 639,219 km², which represents 7.5 % of Brazilian territory (Knoppers et al., 2006). Until the 1980s, the SFR presented a mean flow rate of 3,136 m³ s⁻¹, dropping to 1,815 m³ s⁻¹ after 1986, with well-defined seasonal variation associated with the rainfall regime of its watershed (Medeiros et al., 2011). The SFR watershed represents an important source of sediments and nutrients to the coastal/shelf region and contributes to the maintenance of primary and biological productivity in an otherwise oligotrophic region (Jennerjahn et al., 1999).

The climate in the watershed varies from a humid tropical and high-altitude temperate climate at its headwaters to a semi-arid and arid climate at its middle course, varying again towards a more humid climate in the coastal region (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004). Mean annual rainfall ranges between 400 mm at the middle and low courses of the river and 1,500 mm at its upper course. Due to this climatic pattern, vegetation cover along the watershed includes fragments of *cerrado* (Brazilian savanna) at the upper course, *caatinga* (xeric shrubland) at the middle course, and rainforest in the coastal zone (ANA, 2016). Regarding the entire extension of the watershed, the main outcropping rocks are sedimentary (sandstones and

limestones) (69 %), metamorphic, metasedimentary, meta-igneous and igneous (31 %) (Kosin et al., 2004).

During the Holocene, the SFR formed a wave-dominated delta (Bittencourt et al., 1982; Dominguez et al., 1987) with a muddy deltaic clinoform on the adjacent continental shelf (Araújo et al., 2018; Rangel, 2017; Summerhayes et al., 1976) (Fig. 1).

Figure. 1- Location of the study area (upper left inset), sampling grid and the São Francisco delta clinoforma



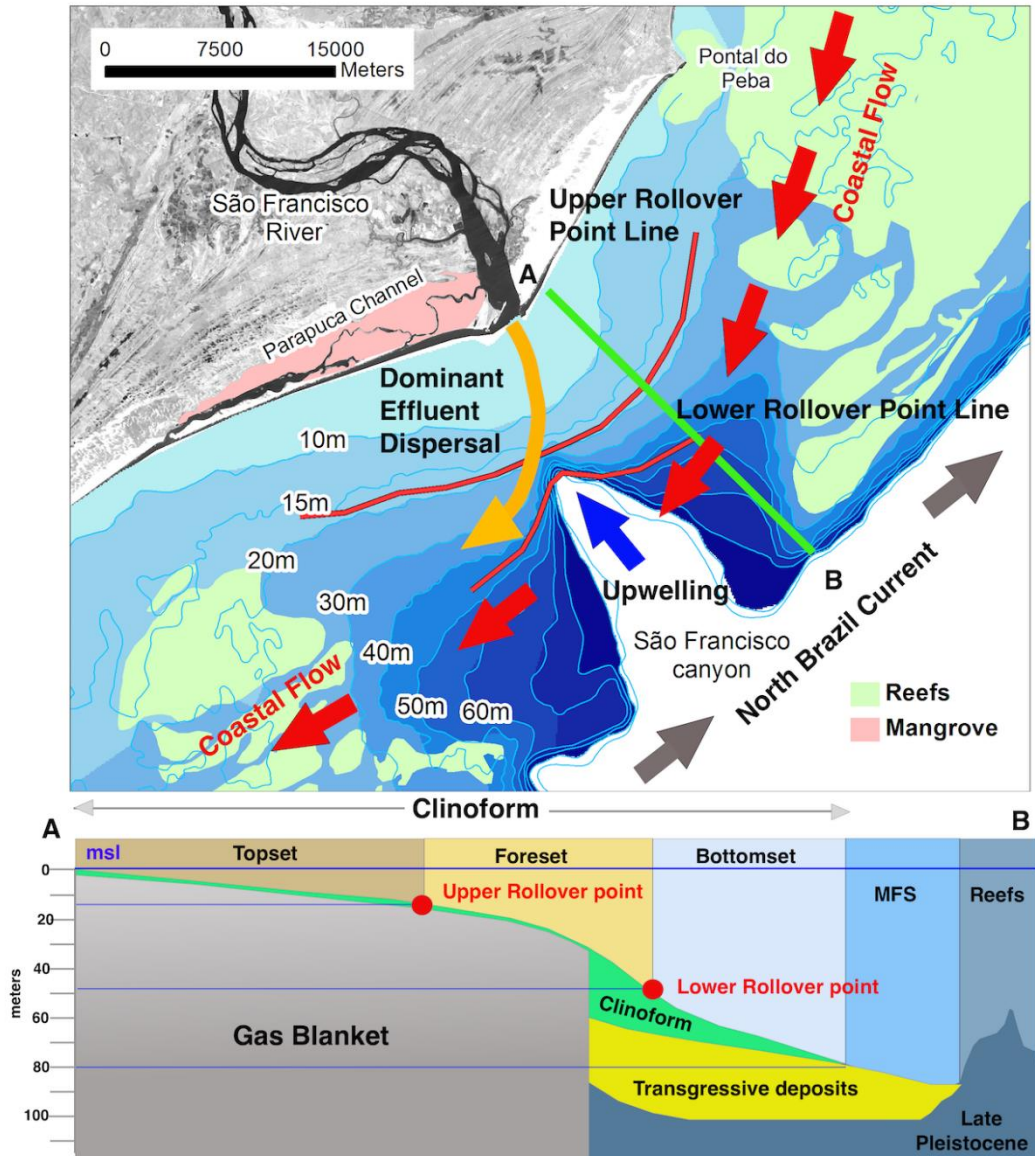
2.2 The Clinoform And Continental Shelf

The continental shelf adjacent to the delta measures approximately 30 km in mean width and is indented by the São Francisco Canyon. The head of this canyon is located only 8 km away from the river mouth (Fig. 1). The portion of the continental shelf facing the SF delta presents a bathymetric depression associated with the canyon head, with abrupt and linear lateral limits, oriented NW-SE (southern limit) and N-S (northern limits) (Fig. 1). A well-defined delta clinoform was built upon this topographic depression and consists of muddy sediments, extending from the shoreline until the isobath of 80 m (Fig. 1). To the sides of this central depression, the continental shelf is considerably shallower, with mostly rocky reef bottoms (Araújo et al., 2018; Coutinho, 1981) (Fig. 1). Bioclastic sedimentation dominates in these regions, which has as its main components fragments of crustose coralline algae and rhodoliths (Carneiro et al., 2007; Nascimento, 2017; Summerhayes et al., 1976). The shelf break in these lateral regions starts at a mean depth of 45 m (Coutinho, 1981).

Figure 2 shows the major provinces of the SFR clinoform, based on Rangel (2017), who reconstructed the evolutionary history of the São Francisco clinoform using high-resolution shallow seismic records and sequence stratigraphy principles. Limits between the topset, foreset and bottomset regions are indicated in figure 2. The modern clinoform advances over a maximum flooding surface that separates the highstand deposits from the transgressive ones (Fig. 2).

Figure. 2 – Major elements of coastal circulation and sedimentary provinces of the deltaic clinoform. Cross section based on illustrations from Rangel (2017). Definitions: The rollover points are the two points of maximum curvature that separate the steeper foreset from the topset (landward) and bottomset (seaward), both with much gentler

gradients (Patrino, Hampson, Jackson, 2015). MFS – Maximum Flooding Surface: depositional surface at the time the shoreline is at its maximum landward position (Posamentier & Allen, 1999).



2.3 Regional Oceanographic Aspects

Coastal circulation at the study area is mainly controlled by trade winds that blow from east and northeast during the austral spring and summer, and from east and southeast by the end of the austral autumn and winter (Bittencourt et al., 1982; Dominguez, 1996; Dominguez et al., 1983). This results in a dominating

southwestwards coastal flow in the study area (Fig. 2). This coastal flow causes the southward deflection of the river plume, envelops the clinoform foreset, and also introduces fine-grained sediment from external regions to the clinoform (Fig. 1). Although no direct measurements of the coastal flow are available, it can be easily seen in satellite images of the region (Fig. 3).

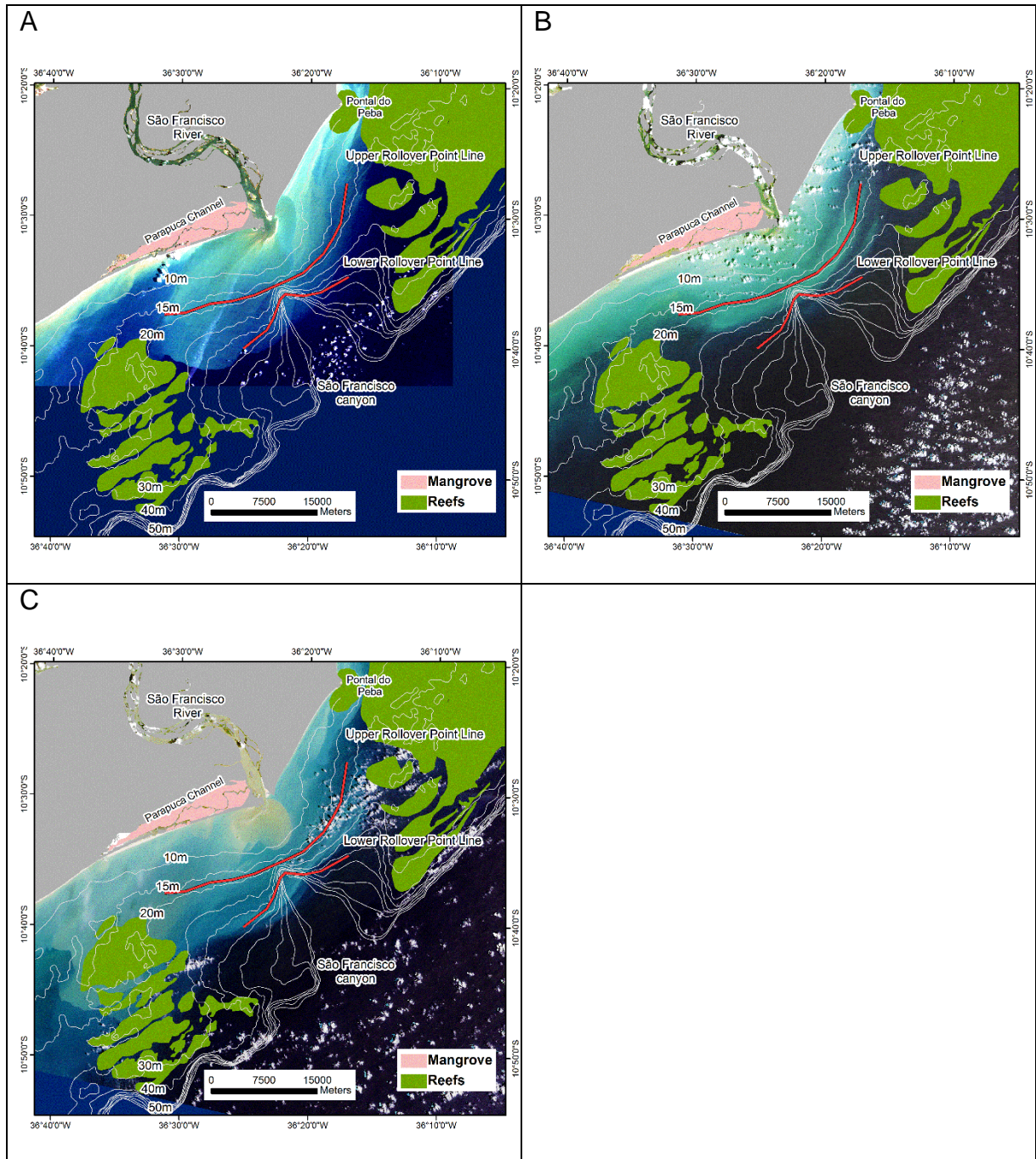
Thus, fine-grained sediment and fluvial plume transport occur mainly southwestwards, except during austral winter months when a northeastward transport is also present (Bittencourt et al., 2005; Dominguez, 1996; Dominguez et al., 1983; Oliveira et al., 2012). However, during the austral winter, flow rates of the SFR are very much reduced. This asymmetry in sediment dispersal is expressed in the morphology of the deltaic clinoform, which presents smoother slopes southwestwards (Fig.1).

The wave-induced longshore drift of sandy sediments along the shoreline, is also mainly oriented southwestwards (Dominguez et al., 1992; Guimarães, 2010). This process leads to asymmetry in the distribution of deltaic plain facies, with mangrove forests found only in the sector located on the leeward side of the river mouth (Santos et al., 2014) (Figs. 1 and 2).

Circulation at the slope region is dominated by the North Brazil Current (NBC) (Fig. 2). This current is oligotrophic, with low biologic productivity (Barreto and Summerhayes, 1975; Jennerjahn and Ittekkot, 1999). It originates from the bifurcation of the South Equatorial Current (SEC), between latitudes 10° S and 14° S, originating the NBC and the Brazil Current (BC), the latter of which flows southwards.

Upwelling has been suggested to possibly affect the SF canyon head (Paes et al., 2007), which is a common process in these settings (Sobarzo and Djurfeldt, 2004; Sobarzo et al., 2001).

Figure 3 – Satellite images of the study area for different years showing pattern of river plume expansion and its southwestwards deflection due to coastal flows. Note that the coastal flow envelops the clinoform foreset limited by the upper and lower rollover point lines. A) 1992 B) 2016 C) 2016



3 MATERIAL AND METHODS

A total of 121 surface sediment samples were collected between 16 and 21 March 2010 from the continental shelf adjacent to the SFR, following a sampling grid with regular spacing of 1 km (Fig. 1). Samples were stored in sterile plastic bags and cooled. Once sampling was complete, the sediment samples were frozen and maintained in this condition until laboratorial procedures.

Grain size analysis was performed in all samples of surface sediments (121). A laser diffraction particle size analyzer (Model HORIBA LA950) was used to determine the grain size of fine particles. Particles larger than 2 mm underwent dry sieving. Results were combined and the software GRADISTAT V 5.0® (Blott and Pye, 2001) was used to determine grain size parameters (selection, median, and silt, clay, sand and gravel contents).

All surface sediment samples that were texturally classified as mud (silt + clay) (76 samples) were analyzed for OM. These samples were treated with hydrochloric acid (HCl) 1 mole L⁻¹ in order to remove any calcium carbonate particles present. They were then rinsed with distilled water and dried once again. Since inorganic nitrogen associated with clays cannot be eliminated (Kao et al., 2003), the nitrogen analysis included both organic and inorganic nitrogen, referred to as total nitrogen (TN).

An element analyzer (Costech) coupled to a mass spectrometer (Thermo Finnigan Delta Plus) was used to determine TOC and TN contents in OM, allowing the simultaneous determination of element composition (% of C and N) and isotopic ratio of $\delta^{13}\text{C}$. Carbon isotopic composition was determined after eliminating carbonates. Quantification is presented in this study as the deviation (‰) from the standard Pee Dee Belemnite (PDB) isotopic composition for carbon isotopes, based on a Cretaceous marine fossil from the Peedee Formation in South Carolina, USA. The analytical error,

obtained through repeated measurements, was 0.2 ‰. Accuracy was certified by continuous control measurements based on an internal standard of the laboratory, while precision was certified based on repetitions. Total carbonate content in sediments was obtained through gravimetric analysis.

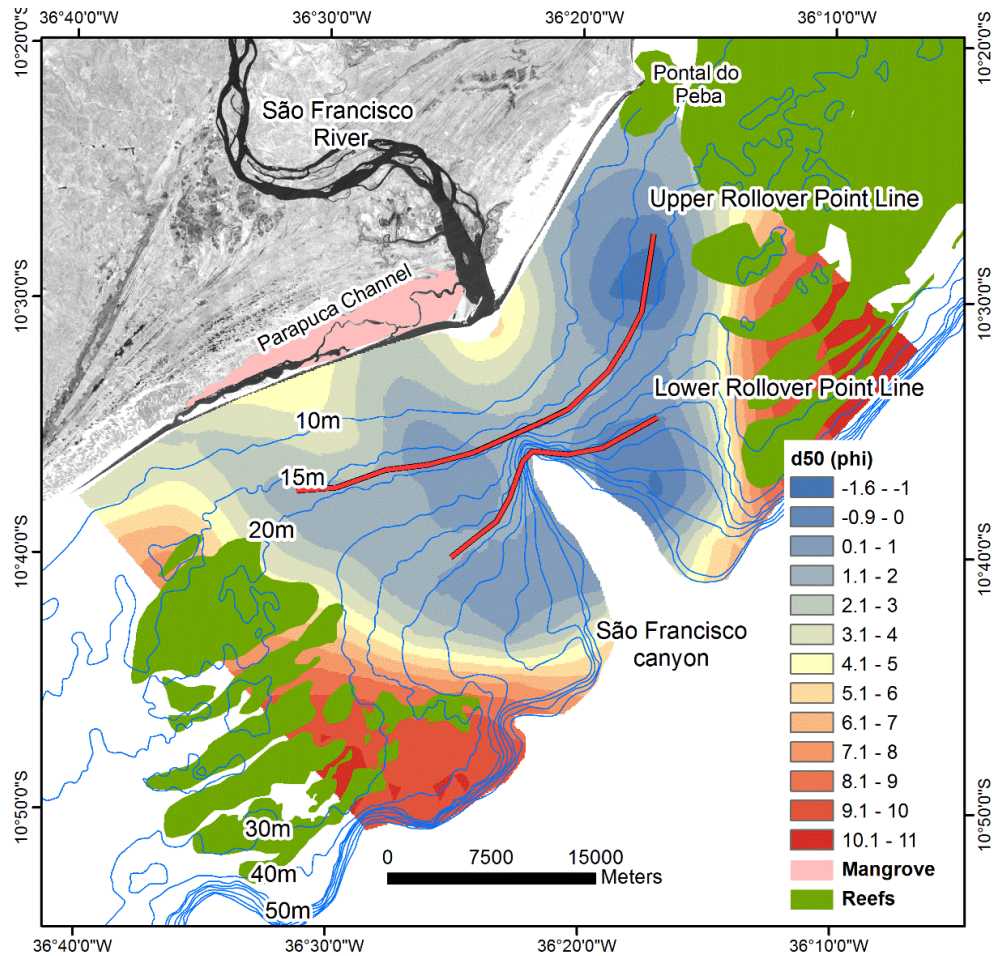
The Inverse Distance Weight (IDW) algorithm was used to interpolate the values of surface sediment parameters analyzed in order to produce maps of spatial distribution. The Jenks Natural Breaks classification method was used to determine the classes represented in the maps produced, since it provided the best arrangement for the values obtained among the different classes (Jenks, 1967). Graphs were produced for the variation of properties found in the sediment cores according to depth.

4 RESULTS

4.1 Grain Size

Figure 4 shows the spatial distribution of D50 values among continental shelf surface sediment samples. As a rule, predominantly fine-grained sediments were observed in the area of the deltaic clinoform, with values of D50 decreasing offshore. However, sediments tended to be slightly coarser on the topset and foreset regions of the clinoform and towards S-SW, following the same dispersion pattern of the fluvial plume. Slightly coarser sediments also occur in front of the tidal channels draining the mangrove areas located downdrift of the river mouth. In the outer portions of the shelf, beyond the deltaic clinoform, sandy and gravely bioclastic sediments dominated.

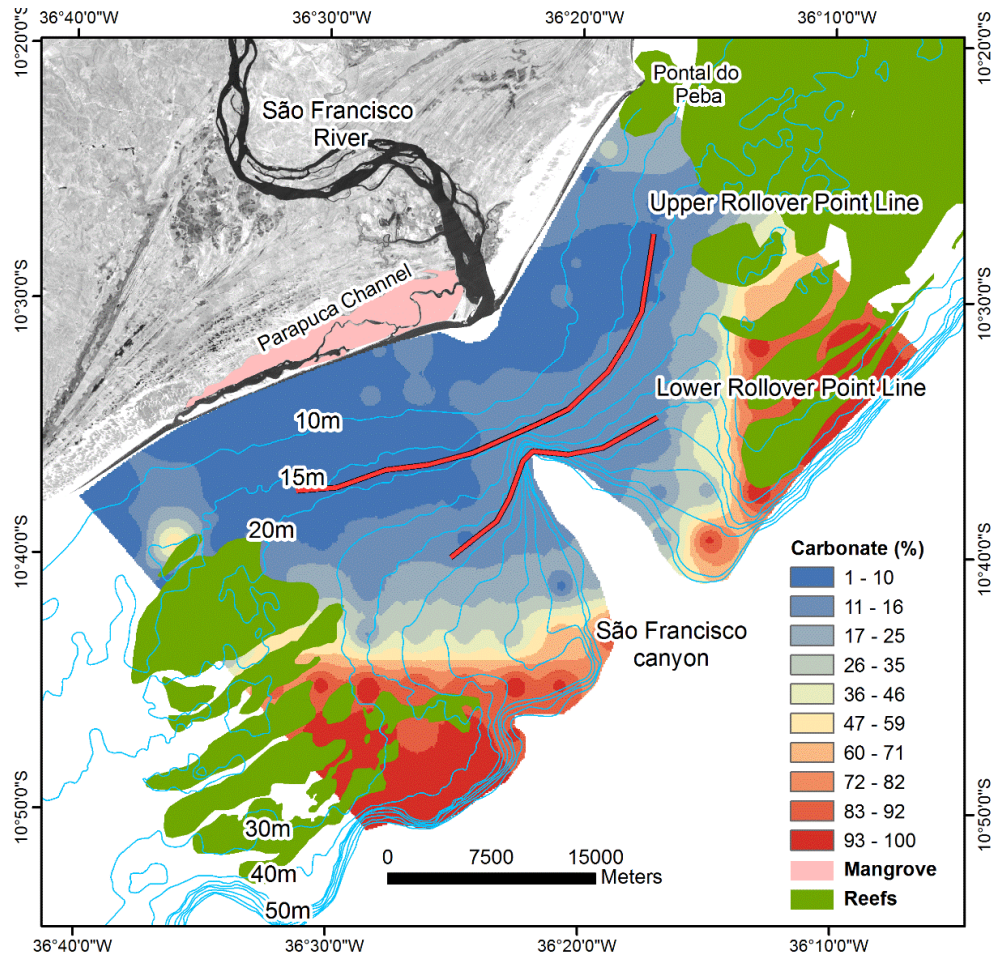
Figure 4 – Grain size distribution of sediments on the shelf and delta clinoform. The clinoform foreset upper and lower rollover point lines are also shown.



4.2 Calcium Carbonate (CaCO₃)

Calcium carbonate contents in fine surface sediments ranged between 1.5 and 99.8 % (Fig. 5). These contents progressively increased the further away from the coast. In the deltaic clinoform itself, calcium carbonate contents ranged between 1.5 and 16.1 %, with the lowest values found mainly in the topset area (Fig. 5). Sediment from the outer shelf, located laterally to the clinoform, was composed of almost 100 % carbonate.

Figure 5 - Calcium carbonate content of sediments on the shelf and delta clinoform. The clinoform foreset upper and lower rollover point lines are also shown.



4.3 Total Organic Carbon and Total Nitrogen

TOC (%) and TN (%) contents are presented in Table 1S (Supporting Information) and their spatial distributions in clinoform sediments are shown in Figures 6 and 7, respectively. TOC ranged between 0.11 and 1.56 %, with mean values of 0.81 ± 0.33 % (Table 1S – Fig. 6). The highest TOC contents (1.28 % to 1.56 %) were found at the northeastern extremity of the study area, near the reef constructions of Ponta do Peba, around the canyon head, and at the clinoform. The lowest values of TOC (< 0.6 %) occurred in the southwestern portion of the study area, near the coast.

The spatial distribution of TN content was similar to the distribution of TOC (Fig. 7). Values of TN ranged between 0.02 and 0.20 % (Table 1S). A significant correlation ($r = 0.958$; $p < 0.001$) was observed between TOC and TN contents (Fig. 1S – Supporting Information). The regression line near the origin suggests that most of the nitrogen measured in the sediment is related to sedimentary organic carbon and, therefore, is likely to have come from an organic source (Hedges et al., 1986). Regression analyses were also conducted between TOC and the depths at which samples were collected ($r = 0.103$; $p > 0.001$) (Fig. 2S - Supporting Information) and between TOC and sediment grain size ($r = 0.325$; $p > 0.001$) (Fig. 3S - Supporting Information). Both analyses presented low correlation and were not significant.

Figure 6 – TOC (%) content of sediments on the shelf and delta clinoform. The clinoform foreset upper and lower rollover point lines are also shown.

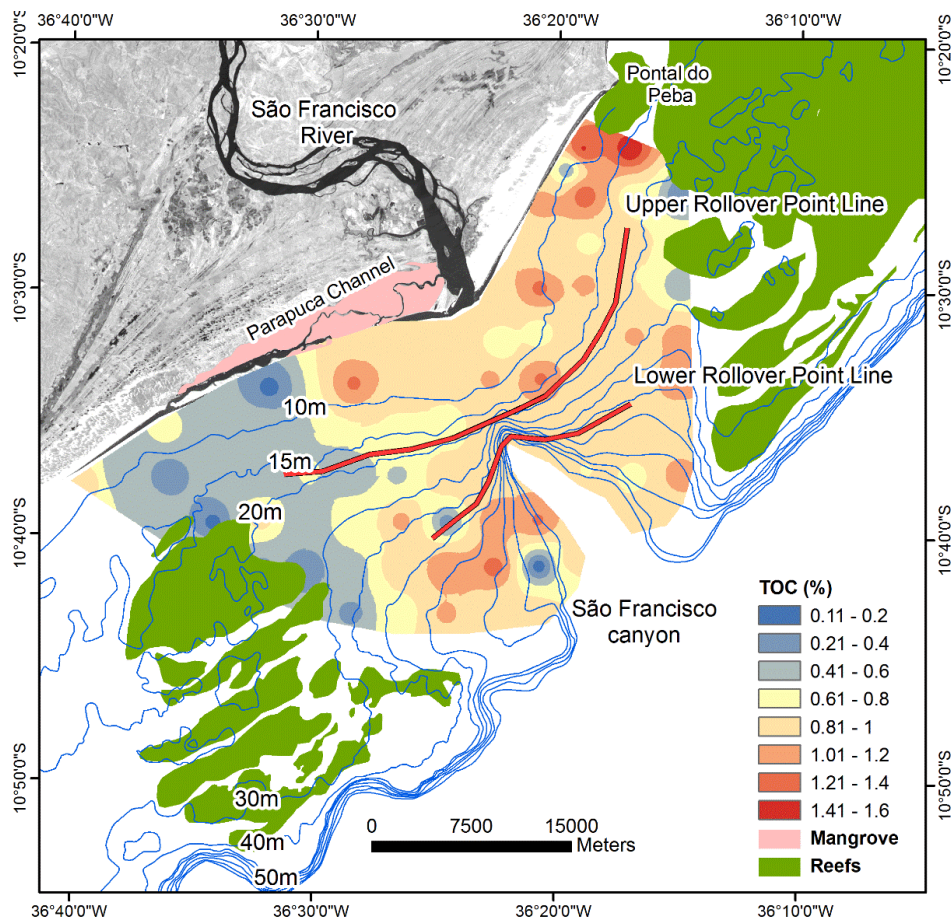
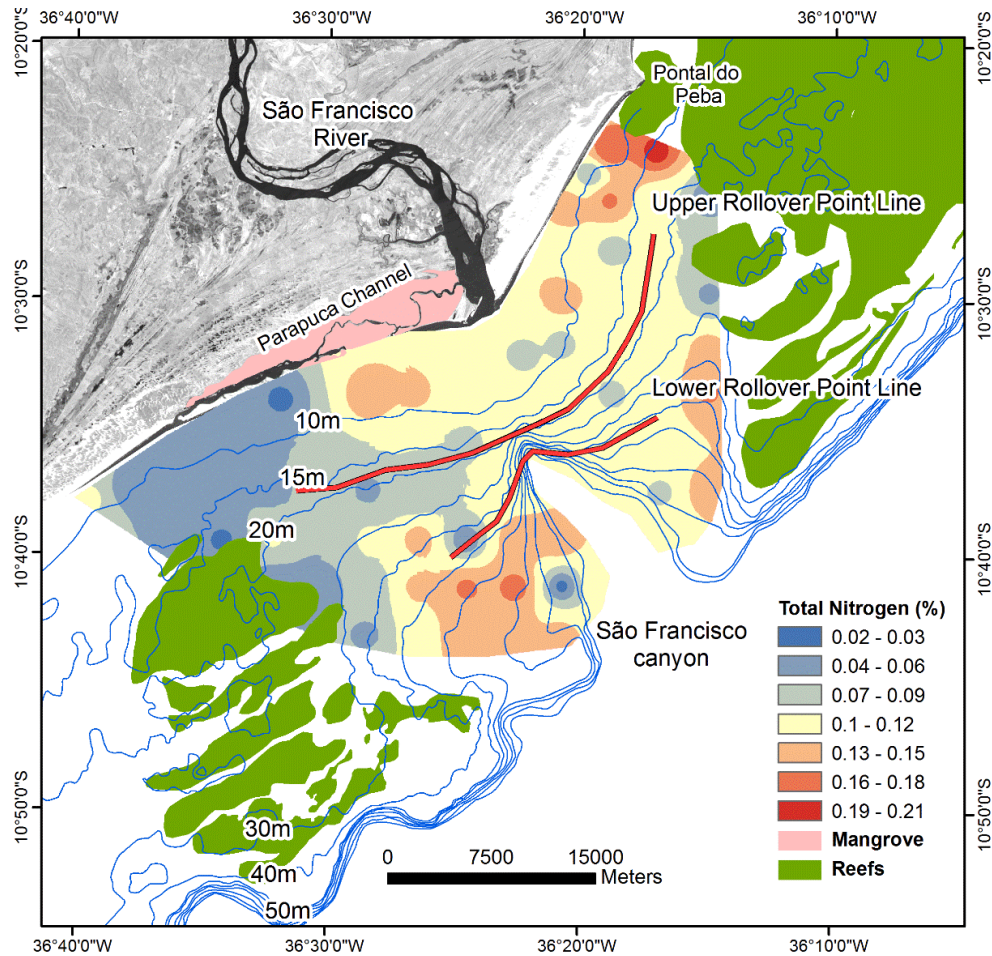


Figure 7 – TN (%) content of sediments on the shelf and delta clinoform. The clinoform foreset upper and lower rollover point lines are also shown.

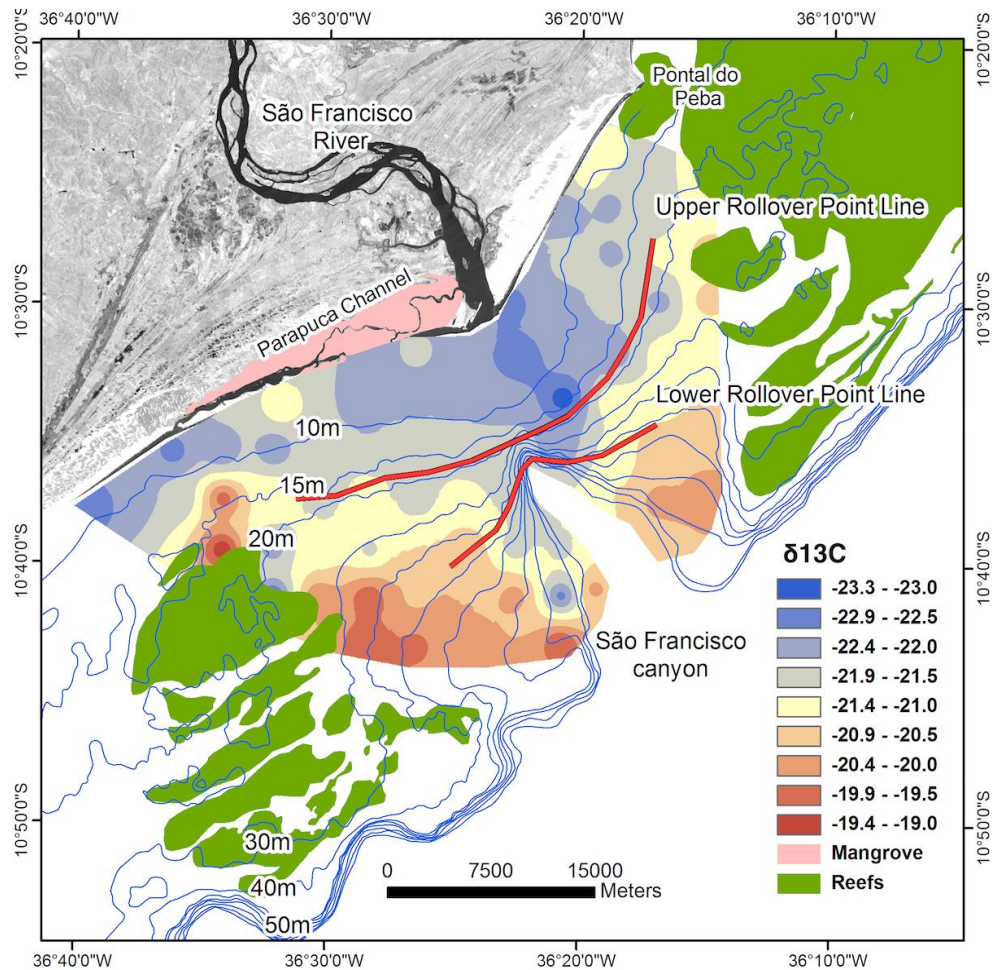


4.4 Carbon Stable Isotopes

$\delta^{13}\text{C}$ in surface sediment presented a mean value of -21.40 ± 0.94 ‰, ranging between -23 and -19 ‰ (Table 1S - Supporting Information). The spatial distribution of $\delta^{13}\text{C}$ values presented an approximately radial pattern in relation to the mouth of the SFR (Fig. 8). In general, less enriched values were found near the clinoform topset (-23.3 ‰ and -21.5 ‰). In the vicinities of the river mouth, values of $\delta^{13}\text{C}$ ranged between -23.3 ‰ and -22.0 ‰ along an approximately NW-SE oriented narrow belt that reaches the head of the São Francisco Canyon. Interestingly this belt also shows a southward deflection, similar to that experienced by the river plume. Impoverishment of $\delta^{13}\text{C}$

values was also observed in the southwestern extremity of the study area, in a narrow sector parallel to the shoreline and located immediately downstream to the tidal channel (Parapuca) that drains the mangrove forests of the deltaic plain. Contents of $\delta^{13}\text{C}$ increased significantly in the region beyond the clinoform, ranging between -21‰ and -19‰ , possibly as a result of being nearer to the reef bottoms that predominate in the external shelf areas located NE and SW from the clinoform (Fig. 8).

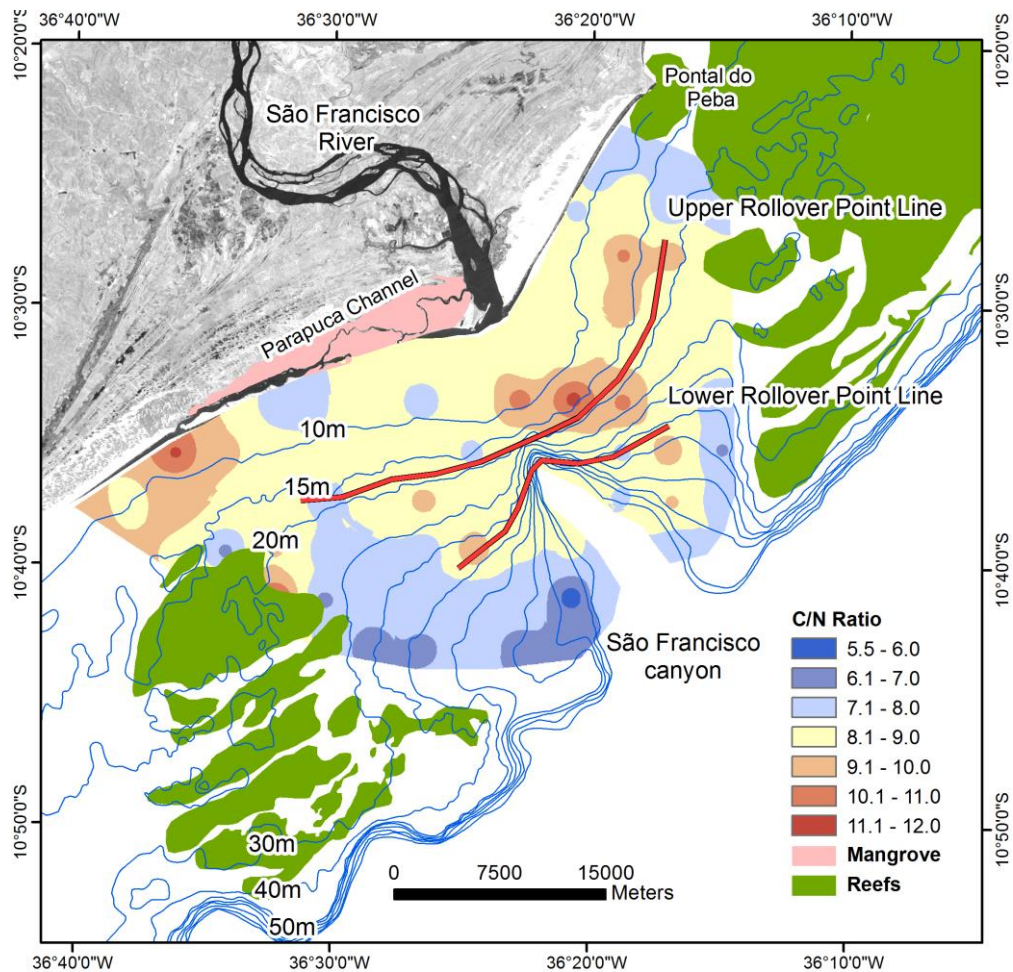
Figure 8 - $\delta^{13}\text{C}$ in sediments on the shelf and delta clinoform. The clinoform foreset upper and lower rollover point lines are also shown.



4.5 Total Organic Carbon/Total Nitrogen ratio (C/N)

C/N ratios in surface sediments ranged between 5.5 and 11.3 (Fig 9), with a mean value of 8.3. The highest values coincided approximately with the limits of the deltaic clinoform (8.6 to 11.3) and decreased in the external region (9.0 to 5.5). C/N values were also higher in the southwestern portion of the investigated area, in association with the mouth of the Parapuca tidal channel, which drains mangrove areas.

Figure 9 - Total Organic Carbon/Total Nitrogen ratio (C/N) in sediments on the shelf and delta clinoform. The clinoform foreset upper and lower rollover point lines are also shown.



5 DISCUSSION

5.1 Sources of Organic Matter to the Study Area

TOC values in bulk surface sediments at our study area are similar to those found in other deltaic regions in Brazil, such as the Paraíba do Sul (Carreira et al., 2015) and Amazon (Ruttenberg and Goñi, 1997; Siqueira et al., 2013) rivers and elsewhere in the world, such as in the Rhône, Niger, Orinoco and Mississippi rivers (Bhianchi et al., 2002; Garcia-Garcia et al., 2006; Kennicutt et al., 1987).

In our study area no relationship was found between TOC and sediment grain size or water depth (Figs. 2S and 3S - Supporting Information). However, as expected, a good correlation existed between TOC and TN, since these are the two major components of organic matter (Mayer, 1994).

If the São Francisco were either the major or sole OM contributor to the area, such gradients (TOC vs grain size, vs depth) would normally be expected. We interpret this lack of correlation and of any onshore-offshore gradients in the spatial distribution of TOC and TN as a result of there being different organic carbon production areas. As already noted, the deltaic clinoform was built in a low-lying area of the continental shelf bordered laterally by reef bottoms, where carbonate sedimentation is dominant, and with the presence of the São Francisco canyon head in the offshore region.

The spatial distribution of CaCO_3 (Fig. 5) clearly suggests that besides the fluvial input of sediments, characterized by low CaCO_3 values, lateral contributions of sediments also occur from the Pontal do Peba reefs located in the extreme northern portion of the study area and from the lateral reef bottoms located northeastwards and southwestwards from the clinoform (Figs. 2, 3 and 5). These lateral contributions, expressed by higher CaCO_3 values, are more significant to the bottomset region of the clinoform and to the maximum flooding surface over which it progrades (Figs. 2, 3 and

5). These different sources of sediment will also translate into different sources of OM, which also helps us understand the spatial distributions of TOC and TN in the study area (Figs. 6 and 7). Interestingly, no significant external lateral contribution of CaCO_3 and OM is found associated with the western extremity of the cliniform (Parapuca channel). Although the seafloor in this region is also characterized by rocky outcrops, carbonate production and associated OM are inhibited due to the influence of the river plume, which flows predominantly southwestwards (Figures 3, 5, 6 and 7). This is corroborated by the fact that CaCO_3 content in the sediment is reduced. Moreover, older sedimentary rocks outcropping offshore in this southwestern region still exhibit its original bedding, which is clearly visible in satellite images, implying absence of biogenic reef constructions.

Finally, upwelling at the canyon head, which enhances primary productivity, is also thought to be a possible source of OM to the region.

5.2 Organic Matter Origin

The spatial distribution of $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios offers corroborating evidence to what we have hypothesized above, i.e. that the spatial distributions of TOC, TN and CaCO_3 content are linked to the existence of three to four major sources of organic matter production for the study area.

$\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios have been widely used to distinguish sources of organic matter and carbon flux in coastal sediments (Carreira et al., 2015; Garcia-Garcia et al., 2006; Meyers, 1994; Meyers, 1997; Lamb et al., 2006; Pancost and Pagani, 2006; Ramaswamy et al., 2008; Usui et al., 2006). In shelf areas, these values reflect the contribution of terrestrial organic matter and nutrients, local increase in primary production associated with the fluvial plume, and lateral contributions of organic matter from other shelf areas (Bhianchi et al., 2002; De Hass et al., 2002).

Usually C/N ratio values between four and eight are indicative of a predominantly marine origin (algae) whereas values greater than 15 are suggestive of a terrestrial origin (vascular plants) (Gao et al., 2012; Lamb et al., 2006; Meyers, 1997). Values in between these two extremes would indicate a mixture of these sources (Meyers, 1997). In our study area, C/N ratios lower than 8 and therefore indicative of a marine origin occurred in areas that also presented evidence of lateral contribution of sediments (higher CaCO₃ values) and OM, as discussed above (Pontal do Peba reefs and reef bottom areas neighboring the canyon head).

At the deltaic clinoform itself, C/N ratios were dominantly in the range of 8 to 9 but reaching values of up to 12 in front of the river mouth and at the western limit of the region down-drift to the Parapuca river channel. According to Meyers (1997), vascular C₃ plants have C/N ratios around 12, whereas C₄ plants show values of around 30. Our results showed that, at the clinoform, C/N ratios were well below those expected for an exclusively continental origin, suggesting a mixture of sources. Low C/N ratios have also been found in other tropical shelf areas located near river mouths and were attributed to anthropogenic influences and/or natural causes. Moreover, preferential sorption of inorganic N by minerals and preferential remineralization of N has also been observed (Hu et al., 2006; Ruttenberg and Goni, 1997).

$\delta^{13}\text{C}$ values for terrestrial plants, characterized by the C₃ photosynthetic pathway, typically vary between -33 ‰ and -22 ‰, whereas C₄ plants such as grasses have values around -14 ‰ to -9 ‰ (Meyers, 1997; Pancost and Boot, 2004). Typical isotopic ratios of marine OM produced by phytoplankton show values between -17 ‰ and -22 ‰ (Gearing et al., 1984; Hedges et al., 1997; Kao et al., 2003). Until finally being incorporated into the sediments, this organic matter experiences several decomposition transformations. This process is controlled by several factors such as

chemical composition and amount of organic matter, nutrient and oxygen availability and temperature, local fauna, and microorganisms found in the soils of the drainage basin and in the marine environment (Leithold et al., 2016; Sanderman and Amundson, 2016). Thus, $\delta^{13}\text{C}$ in bulk marine sediments will not necessarily preserve the original signatures of organic matter sources. In addition, the overlap of $\delta^{13}\text{C}$ from different sources can complicate the attribution of an origin to OM (Mayer, 1994). In this sense, the simultaneous use of $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios can provide more reliable interpretations (Lamb et al., 2006).

The distribution of $\delta^{13}\text{C}$ values in our study area exhibited a clear gradient from the river mouth to offshore areas (Fig. 8). Values from -21.5 to -23 ‰, and from -21 to -21 ‰ characterize respectively the topset and foreset regions of the clinoform. $\delta^{13}\text{C}$ values greater than -20.5 ‰ characterize the clinoform bottomset and the maximum inundation surface regions. Comparisons between this distribution and the areal extension of the river plume, which was visually mapped from satellite images over the last 30 years, shows that the lower $\delta^{13}\text{C}$ values found (-22.5 to -23.3 ‰) mimic the extension of the plume for this period (Fig. 10A). This range of values was also found downdrift from the Parapuca channel, which drains the mangrove forests of the subaerial delta.

Santos et al. (2013) described $\delta^{13}\text{C}$ values for vegetation occurring in the estuarine region of the São Francisco: *Elodea* sp. (grass) -16 ‰, *Montrcardia linifera* (aquatic macrophyte) -27 ‰ and *Rizophora mangle* (mangrove tree) (-28 ‰). In the same study, these authors showed that $\delta^{13}\text{C}$ bulk sediment values progressively became enriched along the river channel, with C/N ratios also decreasing along the same gradient. Along the Parapuca channel, $\delta^{13}\text{C}$ values were more typical of C3 plants because of the dominance of mangrove forests. The lowest $\delta^{13}\text{C}$ values (-23 ‰)

found by Santos et al. (2013) were from sediments collected very close to the river mouth (both inside and outside of the estuarine area) and at the outlet of the Parapuca channel. C/N values close to 12 from these same samples suggest that OM in bulk river-borne sediments have significant contributions from vascular C3 plants. Sedimentary OM exiting the fluvial system presented an isotopic signature of about -23 ‰ (Santos et al. 2013). This value rapidly increases away from the river mouth due to dilution from lateral sediment sources (reef bottoms) and possibly also from nutrient recycling by phytoplankton.

The clinoform topset is characterized by high energy levels from waves and currents, resulting in low accumulation rates (Cattaneo et al., 2007; Pirmez et al., 1998; Swenson et al., 2005). This allows for continuous reworking of sediments, which is clearly seen in satellite images (Fig. 3). This reworking causes changes in the $\delta^{13}\text{C}$ signature of offshore bulk sediment. Close to the upper rollover point line and at the clinoform foreset region, $\delta^{13}\text{C}$ values already reach -19 to -20 ‰ as a result of mixing between terrigenous and locally produced marine OM, and of the contribution of laterally advected sediments and marine OM from the Pontal do Peba and shelf reefs. Because the foreset portion of the clinoform has the highest accumulation rates (Patrino et al., 2015), its isotopic signature will dominate the bulk of clinoform sediments. At the bottomset and Maximum Inundation Surface regions, the $\delta^{13}\text{C}$ isotopic signal is typically marine. Higher marine productivity induced by upwelling may have also played a role in the signatures at and around the canyon head.

Our results, considering overall average values, are similar to other documented fluvially influenced shelf areas in Brazil and elsewhere (Bhianchi et al., 2002; Carreira et al., 2015; Ruttenberg and Goñi, 1997). In a number of these regions, relatively high $\delta^{13}\text{C}$ values have been attributed to a dominance of C4 plants in large portions of the

catchment area. However, averaged values can be misleading, especially if there is no detailed contextualization between the values obtained and the sampled sedimentary provinces. The catchment of the São Francisco river also presents large areas in which C4 plants dominate because of the semi-arid climate. However, even considering all factors involved, clear spatial gradients are observed in the distribution of OM properties. Despite various degrees of mixing of differently sourced OM (riverine and marine either from local phytoplankton production or laterally advected), these gradients can still be mapped and tied to local dynamic processes acting on the different sedimentary provinces of the delta clinoform, and on the local neighboring physiography (Fig. 11).

Trying to apply averaged values to understand past environmental changes of a certain area, especially using downcore analysis, will not produce satisfactory results if detailed reference studies have not been performed previously. Studies such as the one presented herein, reveals how the knowledge of local peculiarities can significantly improve the understanding of the spatial distribution of OM, helping to improve the quality of paleo-environmental reconstructions. Also, the choice of future core location sites for such studies will greatly benefit from reference studies of this sort.

Finally, it should be noted that our reference study is probably representative of low discharge periods, which have dominated the last 30 years in the SFR catchment area. This decrease in rainfall was greatly amplified by the regulatory effect of the large Sobradinho dam, located 748 km upstream from the river mouth. This is corroborated by the good agreement found between the spatial extent of river plumes during this period and the lower $\delta^{13}\text{C}$ values found in the topset region (Fig. 10A). Larger discharges would cause an expansion of the bottom area impacted by the river plume, as exemplified by the last great flood event that affected the region in 1979 (Fig. 10B).

A series of successive high discharge events will have the potential of decreasing $\delta^{13}\text{C}$ values on the topset and foreset regions of the clinoform. Therefore, the best place to collect cores to reconstruct past variations in river discharge would be the region closer to the upper rollover line. In doing so, high sedimentation rates in the foreset region and more continuous reworking of the clinoform topset are avoided.

Figure 10 – A: areal extension of the river plume, visually mapped from satellite images of the last 30 years, plotted on top of bulk sediment $\delta^{13}\text{C}$ values. The clinoform foreset upper and lower rollover point lines are also shown. B: areal extension of the river plume during the 1979 high discharge event, visually mapped from satellite images, plotted on top of bulk sediment $\delta^{13}\text{C}$ values. The clinoform foreset upper and lower rollover point lines are also shown.

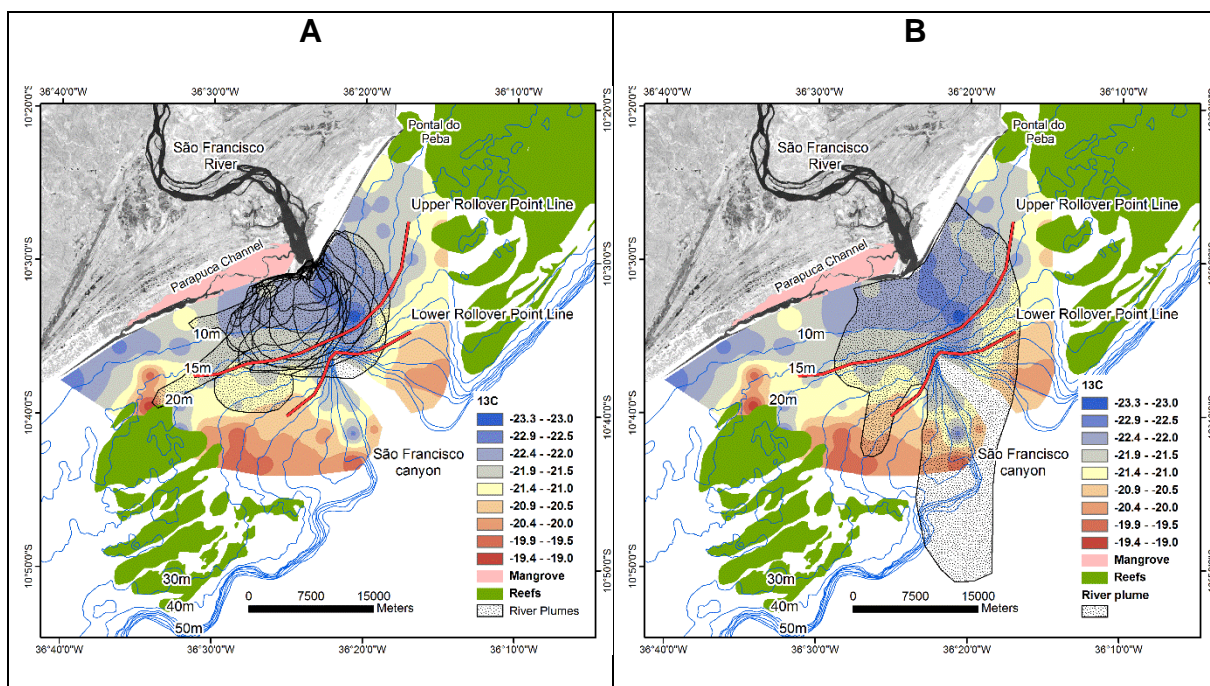
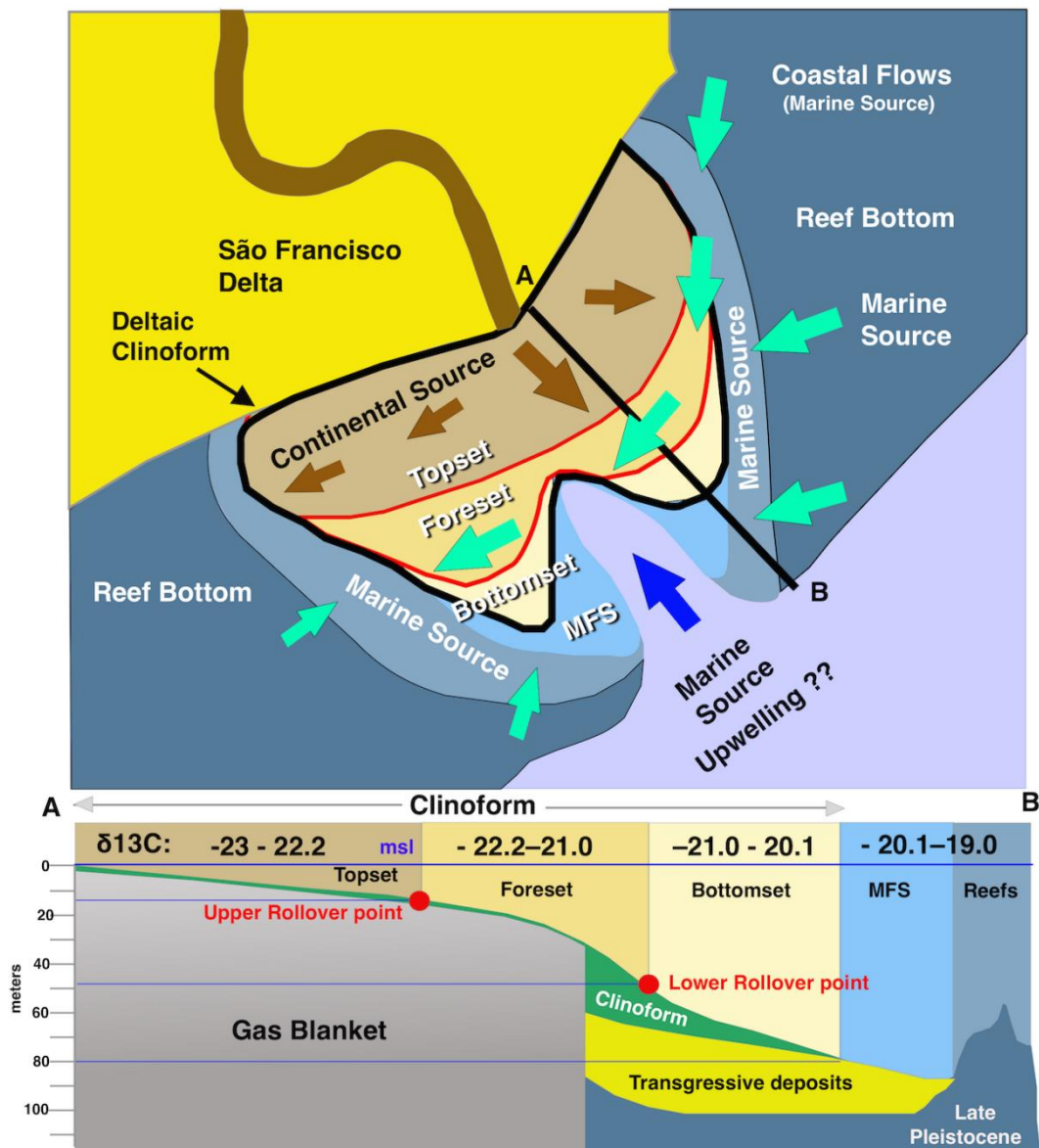


Figure 11 - Conceptual model showing sources of sediments and OM in the deltaic clinoform of the São Francisco and neighboring areas. Major sedimentary provinces and average $\delta^{13}\text{C}$ values in bulk sediment are also depicted. Cross section based on illustrations from Rangel (2017).



6 CONCLUSIONS

Here we have demonstrated the importance of reference studies, based on a detailed and evenly spaced sampling grid and its integration with local geological, geomorphological and geophysical data to better understand the sources and origin of

organic matter and its spatial distribution in deltaic settings. Most studies in the literature, even those using more sophisticated techniques, have mostly focused on sampling strategies using onshore-offshore transects without seeking integration with other local geological and dynamical factors acting on a given study area.

The São Francisco clinoform provinces (topset, foreset and bottomset regions) and neighboring areas (Maximum Flooding Surface, canyon head and reef bottoms) provide a mosaic of bottom types and dynamical provinces that leave distinct OM signatures imprinted in bulk sediments and their spatial distribution patterns (Figure 11). Untangling the causes of these patterns was made possible through integration of the different datasets, discussed herein.

Sources of OM to the São Francisco clinoform are river-borne combined with lateral contributions from reef areas, and possibly in situ phytoplankton production related to local increase of nutrients brought by the river and upwelling at the canyon head region.

The topset region of the clinoform under the direct influence of the river plume presents $\delta^{13}\text{C}$ bulk sediment values more akin of C3 vascular plants, in association with the lowest CaCO_3 contents found. $\delta^{13}\text{C}$ values progressively increase seaward, as a result of lateral contributions from reef areas located either close to the shoreline or on the shelf, and brought into the clinoform foreset region by the southwards directed coastal flows. Typical marine $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios are found in the distal clinoform bottomset and in the Maximum Flooding Surface that outcrops around the canyon head. These two regions also exhibited high TOC contents.

Finally, considering longer temporal scales, the overall OM signatures that will prevail in a deltaic clinoform will be those associated with the foreset region because of the highest rates of sediment accumulation that are typical of these regions. The

clinoform topset is prone to continuous reworking by waves and currents and will hardly preserve any of its surficial more negative $\delta^{13}\text{C}$ signature. Moreover, the bottomset and Maximum Inundation Surface will, as expected, exhibit OM signatures typical of marine environments.

We hope this study will provide a template to improve quality of future paleo-environmental investigations using downcore analysis of OM properties at the São Francisco river clinoform. As noted before, this is one of the most important and most threatened rivers in Brazil due to human uses and climate changes.

Acknowledgements:

This paper is a contribution of the following research grants: CAPES/PNPD (No. 2983/2010) and inctAmbTropic, CNPq/FAPESB (No. 565054/2010-4, 8936/2011 and 465634/2014-1). Drs. Michel Mahiques, Marcelo Cohen, and Ana Luiza Albuquerque provided valuable comments to an earlier version of this manuscript. Their input greatly enhanced its quality. JML Dominguez also thanks CNPq for a research fellowship.

7 REFERENCES

ANA - Agência Nacional de Águas, 2016. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/SaoFrancisco.aspx>> Acesso em: 02 de agosto de 2016.

ANA/GEF/PNUMA/OEA. 2004. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Sergipe-PE. 318.

Araújo, H.A.B., Dominguez, J.M.L., Machado, A.J., Rangel, A.G.A.N., 2018. Benthic foraminifera distribution in a deltaic clinof orm (São Francisco Delta, eastern Brazil): A reference study. *Journal of marine Systems* 186:1-16

Bănar u, D., Harmelin-Vivien, M., Gomoiu, M.T., Onciu, T.M., 2007. Influence of the Danube River inputs on C and N stable isotope ratios of the Romanian coastal waters and sediment (Black Sea). *Marine Pollution Bulletin* 54, 1385–1394. doi:10.1016/j.marpolbul.2007.05.022

Barreto, H. T.; Summerhayes, C.P., 1975. Oceanography and suspended matter off Northeastern Brazil. *Journal of Sedimentary Petrology* 45, 822–833. doi:10.1017/CBO9781107415324.004

Bauer, J.E., Cai, W.-J., Raymond, P. a, Bianchi, T.S., Hopkinson, C.S., Regnier, P. a G., 2013. The changing carbon cycle of the coastal ocean. *Nature* 504, 61–70. doi:10.1038/nature12857

Benito, X., Trobajo, R., Ibáñez, C., Cearreta, A., Brunet, M., 2016. Benthic foraminifera as indicators of habitat change anthropogenically impacted costal wetlands of the Ebro Delta (NE Iberian Peninsula). *Mar. Pollut. Bull.* 101, 163-173.

Bianchi, T.S., Allison, M. A, 2009. Large-river delta-front estuaries as natural “recorders” of global environmental change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 106, 8085–8092. doi:10.1073/pnas.0812878106

Bianchi, T.S., Mitra, S., McKee, B.A., 2002. Sources of terrestrially-derived organic carbon in lower Mississippi River and Louisiana shelf sediments: Implications for

differential sedimentation and transport at the coastal margin. *Marine Chemistry* 77, 211–223. doi:10.1016/S0304-4203(01)00088-3

Bittencourt, A.C.S.P., Dominguez, J.M.L., Martin, L., Silva, I.R., 2005. Longshore transport on the northeastern Brazilian coast and implications to the location of large scale accumulative and erosive zones: An overview. *Marine Geology* 219, 219–234. doi:10.1016/j.margeo.2005.06.006

Bittencourt, A.C.S.P.; Dominguez, J.M.L.; Martin, L.; Ferreira, Y.A., 1982. Dados Preliminares sobre evolução do delta do Rio São Francisco (SE/AL) durante o quaternário: influência das variações do nível do mar. *Atas do VI Simpósio do Quaternário no Bras.* 46–68.

Blair, N.E., Aller, R.C., 2012. The Fate of Terrestrial Organic Carbon in the Marine Environment. *Ann. Rev. Mar. Sci.* 4, 401–423. doi:10.1146/annurev-marine-120709-142717

Blott, S.J., Pye, K., 2001. Gradistat: a grain size distribution and statistic and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes Landforms* 26, 1237–1248.

Burdige, D.J., 2005. Burial of terrestrial organic matter in marine sediments: A re-assessment. *Global Biogeochemical Cycles* 19, 1–7. doi:10.1029/2004GB002368

Burdige, D.J., 2007. Preservation of Organic Matter in Marine Sediments: Controls, Mechanisms, and an Imbalance in Sediment Organic Carbon Budgets? Preservation of Organic Matter in Marine Sediments: Controls, Mechanisms, and an Imbalance in

Sediment Organic Carbon Bud. Chemical Reviews. 107, 467–485.

doi:10.1021/cr050347q

Carlin, J.A., Dellapenna, T.M., 2014. Event-driven deltaic sedimentation on a low-gradient, low-energy shelf: The Brazos River subaqueous delta, northwestern Gulf of Mexico. *Mar. Geol.* 353, 21–30. doi:10.1016/j.margeo.2014.03.017

Carneiro, M.E.R., Fontes, L.C.S., Kowsmann, R.O., Puga-Bernabéu, A., 2007. *Geologia e geomorfologia da bacia de Sergipe-Alagoas*. PETROBRAS. – São Cristóvão: Editora UFS. 265 p.

Carreira, R.S., Cordeiro, L., Oliveira, D.R.P., Baeta, A., Wagener, A.L.R., 2015. Source and distribution of organic matter in sediments in the SE Brazilian continental shelf influenced by river discharges: An approach using stable isotopes and molecular markers. *Journal of Marine Systems* 141, 80–89. doi:10.1016/j.jmarsys.2014.05.017

Cattaneo, A., Trincardi, F., Asioli, A., Correggiari, A., 2007. The western Adriatic shelf clinoform: energy-limited bottomset. *Cont. Shelf Res.* 27, 506-525.

Coutinho, P.N., 1981. Sedimentação na plataforma continental Alagoas-Sergipe. *Arquivo de Ciências do Mar* 21, 1–18.

De Haas, H., Van Weering, T.C.E., De Stigter, H., 2002. Organic carbon in shelf seas: Sinks or sources, processes and products. *Continental Shelf Research.* 22, 691–717. doi:10.1016/S0278-4343(01)00093-0

Dominguez, J.M.L., 1996. The São Francisco Strandplain: a paradigm for wave-dominated deltas?, in: De Batist, M.; Jacobs, P. (Ed.), *Geology of Siliciclastic Shelf Seas*. London, England, pp. 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, 98–105.

Dominguez, J.M.L., Bittencourt, A.C. da S.P., Martin, L., 1992. Controls on Quaternary coastal evolution of the east-northeastern coast of Brazil: roles of sea-level history, trade winds and climate. *Sedimentary Geology* 80, 213–232. doi:10.1016/0037-0738(92)90042-P

Dominguez, J.M.L., Martin, L., Bittencourt, A.C.S.P., 1987. Sea-Level History and Quaternary Evolution of River Mouth-Associated Beach-Ridge Plains Along the East-Southeast Brazilian Coast: a Summary. *Sea-Level Fluctuations and Coastal Evolution* 115–127. doi:10.2110/pec.87.41.0115

Gao, X., Yang, Y., Wang, C., 2012. Geochemistry of organic carbon and nitrogen in surface sediments of coastal Bohai Bay inferred from their ratios and stable isotopic signatures. *Marine Pollution Bulletin*. 64, 1148–1155. doi:10.1016/j.marpolbul.2012.03.028

García-García, A., Orange, D., Lorenson, T., Radakovitch, O., Tesi, T., Miserocchi, S., Berné, S., Friend, P.L., Nittrouer, C., Normand, A., 2006. Shallow gas off the Rhône prodelta, Gulf of Lions. *Marine Geology* 234, 215–231. doi:10.1016/j.margeo.2006.09.005

Gearing, J. N., Gearing, P. J., Rudnick, D.T., Requejo, A. G., Hutchins, M.J., Hutchins, M.J., 1984. Isotopic variability of organic carbon in a phytoplankton-based, temperate estuary. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48, 1089–1098.

Goñi, M. A, Ruttenberg, K.C., Eglinton, T.I., 1998. A reassessment of the sources and importance of land-derived organic matter in surface sediments from the Gulf of Mexico. *Geochimica Cosmochimica Acta* 62, 3055–3075.

Guimarães, J.K., 2010. Evolução do delta do rio São Francisco - estratigrafia do Quaternário e relações morfodinâmicas. Tese de doutorado, Universidade Federal da Bahia, Brazil.

Hedges, J.I., Clark, W.A., Quay, P.D., Richey, J.E., Devol, A.H., Santos, U.D.M., 1986. Compositions and fluxes of particulate material in the Amazon River. *Limnol. Oceanogr.* 31, 717–738.

Hedges, J.I., Keil, R.G., 1995. Sedimentary Organic Matter Preservation: an Assessment and Speculative Synthesis. *Mar. Chem.* 49, 121–122.

Hedges, J.I., Keil, R.G., Benner, R., 1997. What happens to terrestrial organic matter in the ocean? *Org. Geochem.* 27, 195–212. doi:10.1016/S0146-6380(97)00066-1

Hu, J., Peng, P., Jia, G., Mai, B., Zhang, G., 2006. Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopes in sediments of the subtropical Pearl River estuary and adjacent shelf, Southern China. *Marine Chemistry* 98, 274–285. doi:10.1016/j.marchem.2005.03.008

Jenks, George F. 1967. The Data Model Concept in Statistical Mapping, *International Yearbook of Cartography* 7, 186–190.

Jennerjahn, T.C., Ittekkot, V., 1999. Changes in organic matter from surface waters to continental slope sediments off the São Francisco River, eastern Brazil. *Marine Geology* 161, 129–140. doi:10.1016/S0025-3227(99)00045-6

Kao, S., Lin, F., Liu, K., 2003. Organic carbon and nitrogen contents and their isotopic compositions in surficial sediments from the East China Sea shelf and the southern Okinawa Trough. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 50, 1203–1217. doi:10.1016/S0967-0645(03)00018-3

Kennicutt, M.C., Barker, C., Brooks, J.M., DeFreitas, D.A., Zhu, G.H., 1987. Selected organic matter source indicators in the Orinoco, Nile and Changjiang deltas. *Org. Geochem.* doi:10.1016/0146-6380(87)90050-7

Knoppers, B., Weber, R.P.M., Jennerjahn, T., 2006. The São Francisco Estuary, Brazil 5, 51–70. doi:10.1007/698-5-026

Kosin, M., Angelim, L.A.A., Souza, J.D., Guimarães, J.T., Teixeira, L.R., Martins, A.A.M., Bento, R.V., Santos, R.A., Vasconcelos, A.M., Neves, J.P., Wanderley, A.A., Carvalho, L.M., Pereira, L.H.M., Gomes, I.P. 2004. Folha Aracaju SC.24. In: Schobbenhaus, C., Gonçalves, J.H., Santos, J.O.S., Abram, M.B., Leão Neto, R., Matos, G.M.M., Vidotti, R.M. Ramos, M.A.B., Jesus, J.D.A.de. (eds.). *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas Programa Geologia do Brasil*, CPRM, Brasília.

Lamb, A.L., Wilson, G.P., Leng, M.J., 2006. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material. *Earth-Science Rev.* 75, 29–57. doi:10.1016/j.earscirev.2005.10.003

Leithold, E. L., Blair, N. E., & Wegmann, K. W., 2016. Source-to-sink sedimentary systems and global carbon burial: A river runs through it. *Earth-Science Reviews*, 153, 30-42. DOI: 10.1016/j.earscirev.2015.10.011

Marengo, J.A., Chou, S.C., Kay, G., Alves, L.M., Pesquero, J.F., Soares, W.R., Santos, D.C., Lyra, A.A., Sueiro, G., Betts, R., Chagas, D.J., Gomes, J.L., Bustamante, J.F., Tavares, P., 2011. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Clim. Dyn.* 38, 1829–1848. doi:10.1007/s00382-011-1155-5

Mayer, L.M., 1994. Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments. *Geochimical Cosmochimica Acta* 58, 1271–1284. doi:10.1016/0016-7037(94)90381-6

Medeiros, P.R.P., Knoppers, B. a, Cavalcante, G.H., de Souza, W.F.L., 2011. Changes in Nutrient Loads (N, P and Si) in the São Francisco Estuary after the Construction of Dams. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 54, 387–397. doi:10.1590/S1516-89132011000200022

Medina, E., Francisco, M., Sternberg, L., Anderson, W.T., 2005. Isotopic signatures of organic matter in sediments of the continental shelf facing the Orinoco Delta: Possible contribution of organic carbon from savannas. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 63, 527–536. doi:10.1016/j.ecss.2004.10.020

Mendes, I., Lobo, F.J., Fernández-Salas, L.M., López-González, N., Bárcenas, P., Schönfeld, J., Ferreira, 2015. Multi-proxy evidence of rainfall variability recorded in subaqueous deltaic deposits off the Adra River, southeast Iberian Peninsula. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 167, 300–312. doi:10.1016/j.ecss.2015.08.005

Meyers, P.A., 1994. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology* 114, 289–302. doi:10.1016/0009-2541(94)90059-0

Meyers, P.A., 1997. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleochimatic processes. *Org. Geochemical proxies* 27, 213–250.

Nascimento, A.A., 2017. Estrutura na macrofauna bentônica do fundo inconsolidado na plataforma continental de Sergipe, Nordeste do Brasil (PhD Dissertation), Federal University of Bahia, Brazil. 117p.

Oliveira, E.N. de, Knoppers, B.A., Lorenzetti, J.A., Medeiros, P.R.P., Carneiro, M.E., de Souza, W.F.L., 2012. A satellite view of riverine turbidity plumes on the NE-E Brazilian coastal zone. *Brazilian Journal Oceanography* 60, 283–298. doi:10.1590/S1679-87592012000300002

Paes, E. T.; Alcântara, A. V.; Guimaraes, C. R. P.; Araújo, H. M. P.; Alves, J. P. H. 2007. Caracterização ecológica e oceanográfica da Plataforma continental do estado de Sergipe: um ambiente costeiro equatorial sob influência de águas sub-antárticas. *Anais do XII Congresso Latino Americano de Ciências do Mar*, Florianópolis.

Pancost, R.D., Boot, C.S., 2004. The palaeoclimatic utility of terrestrial biomarkers in marine sediments. *Marine Chemistry* 92, 239–261. doi:10.1016/j.marchem.2004.06.029

Pancost, R.D., Pagani, M., 2006. Controls on the carbon isotopic compositions of lipids in marine environments. *Handbook of Environmental Chemistry Vol. 2 Reactions Processes*. 2 N, 209–249. doi:10.1007/698_2_007

Patrino, S., Hampson, G.J., Jackson, C.A.-L., 2015. Quantitative characterisation of deltaic and subaqueous clinofolds. *Earth Science Reviews*, 142, 79-119.

Pirmez, C., Pratson, L.F., Steckler, M.S., 1998. Clinofold development by advection-diffusion of suspended sediment: modeling and comparison to natural systems. *J. Geophys. Res.* 103, 24-141.

Posamentier, H.W. and G.P. Allen 1999. Siliciclastic sequence stratigraphy - concepts and applications. *SEPM concepts in Sedimentology and Paleontology*, no. 7, Tulsa, Oklahoma, USA, 204 p.

Ramaswamy, V., Gaye, B., Shirodkar, P. V., Rao, P.S., Chivas, A.R., Wheeler, D., Thwin, S., 2008. Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopic signatures in sediments from the Ayeyarwady (Irrawaddy) continental shelf, northern Andaman Sea. *Marine Chemistry* 111, 137–150. doi:10.1016/j.marchem.2008.04.006

Rangel, A.G.A.N., 2017. Sedimentação e arquitetura deposicional do delta do São Francisco utilizando sísmica rasa de alta resolução (Undergraduate thesis), Federal University of Bahia, Brazil. 48 p.

Raymond, P. A, Bauer, J.E., 2001. Riverine export of aged terrestrial organic matter to the North Atlantic Ocean. *Nature* 409, 497–500.

Ruttenberg, K.C., Goñi, M. A., 1997. Phosphorus distribution, C:N:P ratios, and $\delta^{13}\text{C}(\text{OC})$ in arctic, temperate, and tropical coastal sediments: Tools for characterizing

bulk sedimentary organic matter. *Marine Geology* 139, 123–145. doi:10.1016/S0025-3227(96)00107-7

Sanderman, J., Amundson, R., 2016. Biogeochemistry of decomposition and detrital processing. In: Schlesinger W.H., ed. *Biogeochemistry*. Boston: Elsevier. 249-316.

Santos, E.S.; Jennerjahn, T., Medeiros, P.R.P.; de Souza, W.F.L.; Knoppers, B.A., 2013. Origem da matéria orgânica sedimentar no delta-estuarino do Rio São Francisco, AL/SE - Brasil. *Geochimica Brasiliensis* 27, 37–48. doi:10.5327/Z0102-9800201300010004

Santos, L.C.M., Matos, H.R., Schaeffer-Novelli, Y., Cunha-Lignon, M., Bitencourt, M.D., Koedam, N., Dahdouh-Guebas, F., 2014. Anthropogenic activities on mangrove areas (São Francisco River Estuary, Brazil Northeast): A GIS-based analysis of cCBERS and SPOT images to aid in local management. *Ocean and Coastal Management* 89, 39–50. doi:10.1016/j.ocecoaman.2013.12.010

Seiter, K., Zabel, M., 2004. Organic carbon content in surface sediments - Defining regional provinces. *Deep. Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 51, 2001–2026. doi:10.1016/j.dsr.2004.06.014

Siqueira, G.W., Aprile, F., Darwich, A.J., Santos, F.R.R., Miguéis, A.M.B., 2013. Geochemical and Sedimentary flux Aspects in Amazon Continental Shelf. *Research Journal Marine Sciences* 1, 1–7.

Sobarzo, M., Djurfeldt, L., 2004. Coastal upwelling process on a continental shelf limited by submarine canyons, Concepción, central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109, 1-20. doi:10.1029/2004JC002350.

Sobarzo, M., M. Figueroa, and L. Djurfeldt (2001), Upwelling of surface water into the rim of the Biobío submarine canyon as a response to surface winds, *Cont. Shelf Res.*, 21, 279 – 299, doi:10.1016/S0278-4343(00)00082-0.

Summerhayes, C.P., Fainstein, R., Ellis, J.P., 1976. Continental margin off Sergipe and Alagoas, northeastern Brazil: A reconnaissance geophysical study of morphology and structure. *Marine Geology* 20, 345–361. doi:10.1016/0025-3227(76)90112-2

Swenson, J.B., Paola, C., Pratson, L., Voller, V.R., 2005. Fluvial and marine controls on combined subaerial and subaqueous delta progradation: morphodynamic modeling of compound-clinoform development. *J. Geophys. Res.* 110, 1-16.

Usui, T., Nagao, S., Yamamoto, M., Suzuki, K., Kudo, I., Montani, S., Noda, A., Minagawa, M., 2006. Distribution and sources of organic matter in surficial sediments on the shelf and slope off Tokachi, western North Pacific, inferred from C and N stable isotopes and C/N ratios. *Marine Chemistry* 98, 241–259. doi:10.1016/j.marchem.2005.10.002

Zhang, J., Wu, Y., Jennerjahn, T.C., Ittekkot, V., He, Q., 2007. Distribution of organic matter in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and their stable carbon and nitrogen isotopic ratios: Implications for source discrimination and sedimentary dynamics. *Marine Chemistry* 106, 111–126. doi:10.1016/j.marchem.2007.02.003

Zhou, L., Liu, J., Saito, Y., Gao, M., Diao, S., Qiu, J., Pei, S., 2016. Modern sediment characteristics and accumulation rates from the delta front to prodelta of the Yellow River (Huanghe). *Geo-Marine Lett.* 36, 247–258. doi:10.1007/s00367-016-0442-x

Supporting Information

Figure 1S: TOC vs. TN plot for the bulky surface sediments at the deltaic clinoform of the São Francisco river.

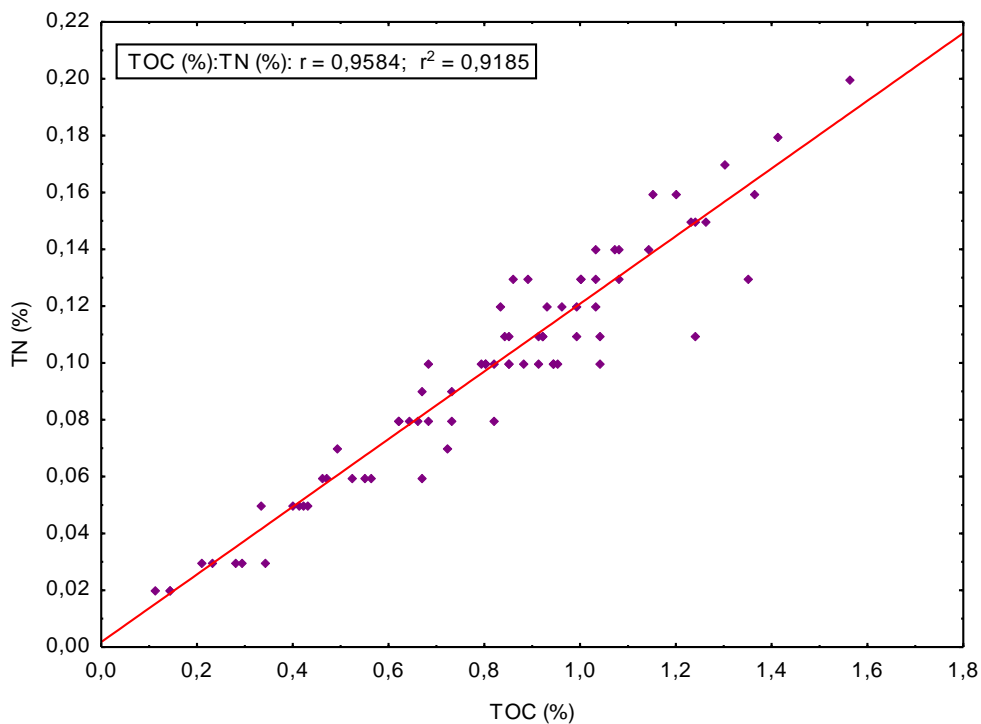


Figure 2S: TOC vs water depth plot for the bulky surface sediments at the deltaic clinoform of the São Francisco river.

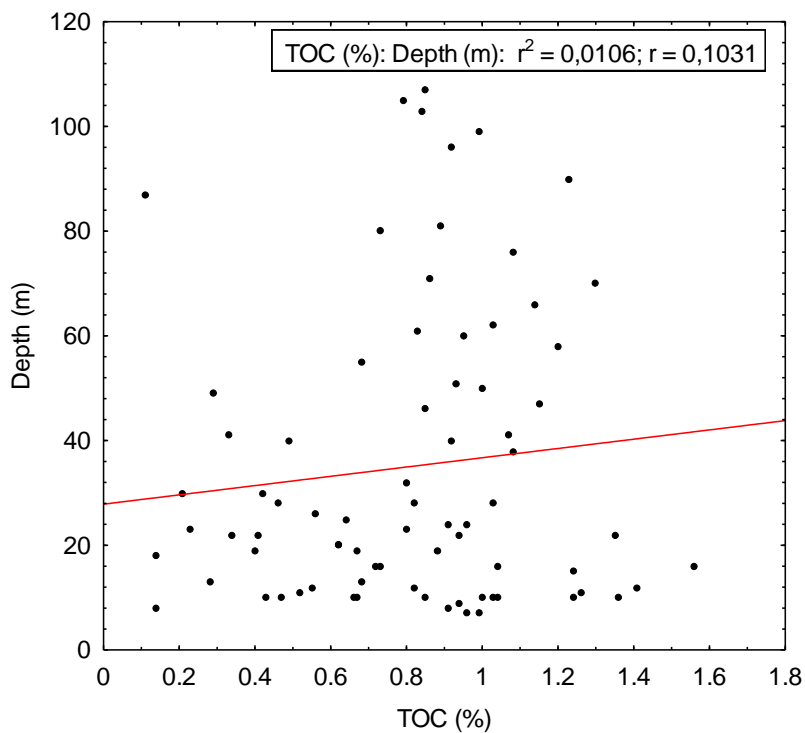


Figure 3S:TOC vs %mud plot for the bulky surface sediments at the deltaic clinoform of the São Francisco river.

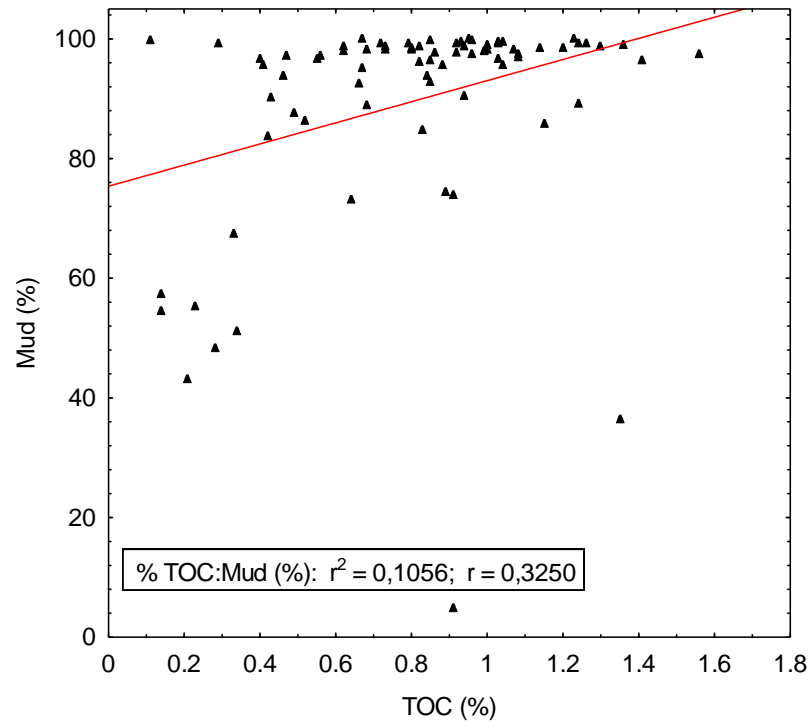


Table 1S: Distribuição dos parâmetros geoquímicos nos sedimentos superficiais de fundo na clinofoma deltaica do rio São Francisco

Station N°	Water Depth	TOC	TN	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	TOC:TN	Carbonate	D50
	m	%	%	‰	‰	(C/N)	%	Phi
1	9	0,94	0,10	-22,9	-	11,00	9,3	6,16
2	-	-	-	-	-	-	1,5	1,42
3	-	-	-	-	-	-	2,2	0,66
4	-	-	-	-	-	-	2,5	2,51
5	-	-	-	-	-	-	87,2	-0,56
6	-	-	-	-	-	-	97,1	-1,33
7	-	-	-	-	-	-	99,8	-0,90
8	-	-	-	-	-	-	97,3	-
9	-	-	-	-	-	-	99,8	-1,63
10	-	-	-	-	-	-	94,2	0,35
11	-	-	-	-	-	-	58,7	1,20
12	22	1,35	0,13	-20,2	3,5	12,17	16,4	3,36
13	-	-	-	-	-	-	55,5	0,52
14	10	0,43	0,05	-22,5	3,3	10,06	8,5	7,25
15	13	0,28	0,03	-22,0	0,6	10,88	14,6	3,86
16	18	0,14	0,02	-19,2	0,2	7,96	4,8	4,15
17	22	0,34	0,03	-23,1	1,0	13,10	12,4	5,41
18	-	-	-	-	-	-	51,2	2,43
19	-	-	-	-	-	-	97,5	-0,56
20	-	-	-	-	-	-	85,7	1,03
21	-	-	-	-	-	-	98,8	-1,34
22	-	-	-	-	-	-	99,7	-1,98
23	-	-	-	-	-	-	91,8	-0,30
24	41	0,33	0,05	-19,5	-	7,72	15,8	4,34
25	30	0,21	0,03	-20,0	-	7,96	23,1	3,85
26	24	0,91	0,10	-22,4	5,0	10,65	10,7	6,11
27	17	-	-	-19,8	1,5	-	3,8	5,75
28	10	0,67	0,06	-22,7	4,3	12,99	8,0	6,42
29	12	0,55	0,06	-22,4	3,6	10,76	7,8	7,68
30	19	0,40	0,05	-21,0	0,6	9,36	6,6	8,65
31	28	0,46	0,06	-21,2	2,2	9,01	8,0	8,31
32	40	0,49	0,07	-19,6	1,5	8,19	11,9	7,04
33	55	0,68	0,10	-19,9	2,9	7,96	30,5	7,65
34	-	-	-	-	-	-	89,8	-0,11
35	-	-	-	-	-	-	92,0	0,57
36	-	-	-	-	-	-	96,9	-1,26
37	62	1,03	0,14	-20,1	3,0	8,66	31,3	8,17
38	50	1,00	0,13	-20,6	3,3	9,01	24,0	8,42
39	32	0,80	0,10	-21,6	2,8	9,36	11,3	8,05
40	20	0,62	0,08	-21,7	4,3	9,13	7,9	8,47

41	11	0,52	0,06	-22,4	2,9	10,06	5,7	6,66
42	7	-	-	-	-	-	3,0	4,17
43	8	0,14	0,02	-21,2	1,5	8,42	3,0	4,11
44	-	-	-	-	-	-	-	4,17
45	22	0,41	0,05	-21,3	3,7	9,59	6,9	7,35
46	41	1,07	0,14	-21,0	4,3	8,89	12,4	7,54
47	58	1,20	0,16	-20,5	3,4	8,78	17,5	8,32
48	71	0,86	0,13	-20,5	3,7	7,72	24,9	12,00
49	-	-	-	-	-	-	93,5	1,72
50	81	0,89	0,13	-19,5	3,8	7,96	66,3	7,66
51	70	1,30	0,17	-20,3	3,9	8,89	19,8	7,88
52	49	0,29	0,03	-20,5	0,8	11,35	9,0	7,68
53	26	0,56	0,06	-21,8	3,8	10,88	9,5	7,00
54	-	-	-	-	-	-	3,1	4,43
55	-	-	-	-	-	-	3,4	4,40
56	-	-	-	-	-	-	2,0	3,90
57	10	1,24	0,15	-22,4	4,8	9,71	11,1	7,69
58	16	0,73	0,09	-21,5	3,6	9,48	7,8	11,52
59	24	0,96	-	-21,3	5,8		8,2	9,69
60	66	1,14	0,14	-21,7	3,7	9,48	14,3	7,60
61	87	0,11	0,02	-22,6	-	6,44	8,5	8,83
62	-	-	-	-	-	-	95,3	1,39
63	107	0,85	0,11	-20,4	2,3	9,01	21,9	11,05
64	90	1,23	0,15	-21,6	3,9	9,59	14,5	8,28
65	99	0,99	0,11	-21,7	4,7	10,53	15,3	7,50
66	20	0,62	0,08	-21,8	3,2	9,13	9,3	7,86
67	10	1,00	0,13	-22,2	6,3	9,01	10,7	7,36
68	7	0,96	0,12	-22,1	4,4	9,36	10,2	7,57
69	7	0,99	0,12	-21,9	5,3	9,71	12,4	7,41
70	10	0,85	0,10	-22,2	4,6	9,95	10,5	5,62
71	96	0,92	0,11	-21,5	4,9	9,83	12,0	8,04
73	103	0,84	0,11	-20,6	3,6	8,89	22,5	8,27
74	105	0,79	0,10	-21,0	2,3	9,24	13,9	8,94
75	40	0,92	0,11	-22,4	3,5	9,83	11,0	6,84
76	10	1,04	0,10	-22,2	2,7	12,17	13,2	6,72
77	-	-	-	-	-	-	1,5	3,85
78	-	-	-	-	-	-	-	1,01
79	10	0,66	0,08	-23,0	2,7	9,71	9,3	6,91
80	15	1,24	0,11	-23,3	4,2	13,22	10,7	6,65
81	51	0,93	0,12	-21,4	4,0	9,13	13,0	11,35
82	80	0,73	0,08	-20,3	4,1	10,65	14,4	11,97
83	-	-	-	-	-	-	93,1	2,24
84	76	1,08	0,14	-20,1	3,8	9,01	20,8	11,93
85	60	0,95	0,10	-20,7	2,5	11,12	11,4	9,46
86	28	0,82	0,08	-21,1	3,9	11,93	12,6	7,68
87	13	0,68	0,08	-22,1	3,2	9,95	6,8	8,68

CAPÍTULO 3**ARTIGO 2**

SEDIMENTAÇÃO RECENTE NA CLINOFORMA DELTAICA DO RIO SÃO**FRANCISCO: POSSÍVEL EFEITO DOS BARRAMENTOS**

Narayana Flora Costa Escobar¹; José Maria Landim Dominguez¹

¹ Geosciences Institute - UFBA, Graduate Program in Geology, Universidade Federal da Bahia, 40170-115 – Bahia - Brazil

ABSTRACT

O sistema deltaico do rio São Francisco (RSF), nordeste do Brasil, foi construído em uma região topograficamente baixa ao redor da cabeceira do cânion do São Francisco (SF) e está sujeito a uma forte sazonalidade climática. Este sistema foi afetado pela alternância de períodos secos e úmidos, assim como pelas inúmeras atividades antrópicas, como a construção de barragens, particularmente nas sete últimas décadas. A instalação de grandes barramentos ao longo de sua bacia hidrográfica reduziu significativamente o aporte de sedimentos com alterações perceptíveis em sua região estuarina e planície deltaica. Dois testemunhos rasos foram coletados na clinoforma deltaica do RSF, localizados a nordeste (ST6) e a sudoeste (ST4) de sua foz, na isóbata de 20 m. Um estudo multi-parâmetro foi realizado, incluindo tamanho do grão, carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}$), análise elementar Ti/Ca e Fe/Ca, além da aquisição de linhas sísmicas rasas de alta resolução transversais a costa, a fim de compreender a expressão sedimentar de ciclos climáticos recentes e possíveis efeitos das intervenções antrópicas na bacia hidrográfica. Os resultados encontrados mostraram a existência de uma boa correspondência entre a cor dos sedimentos, %areia, razão Ti/Ca e Fe/Ca, COT e $\delta^{13}\text{C}$, sendo interpretados como períodos de maior suprimento de sedimento para a

plataforma, sugerindo um controle na distribuição vertical destes parâmetros por eventos de cheia do RSF. O caráter da sedimentação deltaica é essencialmente episódico, acompanhando o comportamento sazonal da precipitação na bacia de drenagem. Contudo, em função das diferentes localizações dos sítios de coleta em relação ao comportamento geral da pluma do rio, o testemunho ST6 reflete melhor as grandes cheias, enquanto o furo ST4 mostra um comportamento mais uniforme, ligada a influência mais continuada da pluma fluvial. A geometria dos refletores sísmicos corrobora esta interpretação. Os registros sísmicos mostraram as mesmas unidades sismoestratigráficas em ambos os testemunhos. O topo apresenta um caráter retrogradacional, típico de um menor aporte sedimentar. Ao passo que as três unidades subsequentes até a base apresentam caráter progradacional. Em ambos os testemunhos o aumento do teor de finos em direção ao topo acompanhada dos baixos teores da razão Fe/Ca e Ti/Ca são interpretados como consequências da brusca regularização da vazão do RSF a partir de 1986, pela instalação de barramentos e em função da diminuição da precipitação na bacia de drenagem.

Palavras-Chave: Sedimentação Episódica; Deltas; Barragens; Rio São Francisco.

1 INTRODUÇÃO

Os deltas são ambientes de deposição de sedimentos de origem continental e marinha e, por essa razão, representam um local estratégico para investigar a relação entre os processos oceânicos e as mudanças ambientais continentais (Syvitski, 2003; Bianchi et al., 2009; Nittrouer et al., 2009; Mendes et al., 2010; Mendes et al., 2015). Os rios são os principais fornecedores de sedimentos para os ambientes costeiros, contribuindo com cerca de 85-90% de todo material transportado (Milliman; Meade,

1983; Syvitski et al., 2003; Nittrouer et al., 2009). A maior parte deste sedimento é fornecido por eventos episódicos de grande energia e curta duração, tais como cheias e tempestades (Nittrouer; Sternberg, 1981; Wheatcroft et al., 1996; Carlin; Dellapenna, 2014). As clinofformas deltaicas representam, portanto, um repositório das mudanças ambientais ocorridas na bacia de drenagem e na zona costeira (Syvitski, 2003; Bhanchi et al., 2009; Nittrouer et al., 2009).

Ao longo do século XX, a influência antrópica, principalmente via construção de grandes barramentos reduziu significativamente o aporte de sedimentos pelos sistemas fluviais (Syvitski, 2008). Como consequência, muitos deltas estão atualmente ameaçados pela erosão e subsidência em decorrência do efeito combinado desta redução no aporte sedimentar e o aumento do nível relativo do mar (Vörösmarty et al., 2003; Syvitski et al., 2005; Syvitski, 2008).

O rio São Francisco (RSF), um dos maiores rios da América do Sul, com extensão aproximada de 2.900 km e com uma bacia de drenagem de 634.000 km², construiu durante o Holoceno um delta dominado por ondas que apresenta uma clinofforma deltaica bem desenvolvida em sua porção submersa (Guimarães, 2010; Rangel e Dominguez, 2015; Rangel e Dominguez, 2019, no prelo). Em função de uma cascata de barragens construídas no período de 1955-1994, ocorreu uma dramática redução no aporte de sedimentos fluviais da ordem de 90% nos últimos 40 anos, com impactos perceptíveis na planície deltaica e estuário (Milliman, 1975; Knoppers et al., 2006; Medeiros et al., 2011). Além disso, estudos tem mostrado uma redução da precipitação na Bacia do SF nos últimos 57 anos da ordem de 25% (de Jong et al., 2018). Ademais, projeções futuras indicam uma redução na precipitação na região nordeste do Brasil para as próximas décadas (Marengo et al., 2015; Marengo et al., 2016; de Jong et al., 2018).

O objetivo desse trabalho foi investigar as mudanças ambientais recentes registradas nos sedimentos da clinofórmula deltaica do RSF e a expressão sedimentar de ciclos climáticos recentes utilizando testemunhos rasos. Para isso, foram utilizadas razões elementares para identificar variações na contribuição relativa de sedimentos terrígenos e marinhos (Fe/Ca e Ti/Ca), características da matéria orgânica na amostra total ($\delta^{13}\text{C}$ e razão C/N, Carbono Orgânico Total - COT e CaCO_3), parâmetros texturais do sedimento (tamanho de grão, diâmetro médio e classificação) e registros sísmicos de alta resolução nos sítios de coleta.

2 CENÁRIO REGIONAL

2.1 Clima, Regime Hidrológico e Dispersão de Sedimentos

O clima ao longo da bacia do RSF varia entre Tropical úmido e temperado de altitude, em sua nascente, passando para um clima semiárido a árido no Médio e Submédio da bacia e úmido na região do baixo São Francisco. A precipitação total anual varia de 500 mm ano⁻¹ (próximo à foz) para 1400 mm ano⁻¹ (na parte superior da bacia) (Correa et al., 2012).

De modo geral, a pluviosidade no alto da bacia, é responsável por 43% da vazão, e está associada a Zona de Convergência do Atlântico Sul – SACZ. O médio curso responsável por cerca de 57% da vazão, tem sua precipitação influenciada pela SACZ e pela Zona de Convergência Intertropical – ITCZ. As chuvas no baixo curso são influenciadas pelos Sistemas Frontais (Molion; Bernardo, 2002; Brasil, 2006). Modelos de larga escala indicam que anomalias na posição da ITCZ e da SACZ podem modificar temporariamente a distribuição de chuvas na bacia, levando a condições de secas ou de chuvas severas (Chaves; Cavalcanti, 2001; Zhou; Lau, 2001).

O RSF é a principal fonte regional de sedimento para a plataforma continental adjacente. As maiores vazões do rio são observadas entre novembro e janeiro, período chuvoso no alto e médio curso da bacia (Pereira et al., 2007). O sistema de dispersão dos sedimentos é fortemente influenciado pela circulação costeira (Oliveira et al., 2012). Embora o talude continental seja banhado pela Corrente Norte do Brasil, a circulação costeira é controlada principalmente pelos ventos alísios de leste e nordeste, que sopram durante a primavera e o verão austral, e pelos ventos leste e sudeste no final do outono e inverno austral (Dominguez, 1996; Dominguez et al., 1983; Bittencourt et al., 1982). Com isso, o resultado é um fluxo costeiro dominante para sudoeste na área de estudo, que causa a deflexão da pluma do rio para Sul (Oliveira et al., 2012). O transporte de sedimentos, principalmente os finos, ocorre principalmente para sudoeste, exceto durante os meses de inverno, quando o transporte é dominante para nordeste (Bittencourt et al., 2005; Dominguez, 1996; Dominguez et al., 1983; Oliveira et al., 2012).

O regime de vazão do rio é controlados pela sazonalidade da precipitação, com períodos secos e úmidos bem marcados. As modificações no regime de vazão iniciaram-se a partir da instalação da primeira barragem em 1952, intensificando-se após 1979, com a construção do Lago de Sobradinho. A partir de 1987 houve uma diminuição nos eventos de inundação e mudanças nas durações dos eventos de cheias e suas magnitudes, acentuadas a partir de 1994, com a construção da barragem de Xingó (Medeiros et al., 2011; Knoppers et al, 2006).

2.2 A Clinoforma deltaica

A plataforma continental adjacente ao SF caracteriza-se por ser uma das margens passivas mais estreitas e rasas do mundo. A largura média da plataforma é de aproximadamente 30 km, variando entre 20 e 40 km, com inclinação de 1:500. A

largura mínima de 8 km ocorre na cabeceira do cânion do SF, localizada frontalmente à desembocadura fluvial (Summerhayes et al. 1976). O delta do SF foi construído em uma região topograficamente baixa com limites abruptos ao redor da cabeceira do cânion do SF. Esta depressão gerou um espaço adicional de acomodação que favoreceu a formação de uma clinoforma lamosa com 15 metros de profundidade, associada ao delta atual do SF (Rangel e Dominguez, 2019).

Os sedimentos siliciclásticos estão concentrados próximos à costa e sobre a clinoforma deltaica, ao passo que nas áreas externas ao delta a sedimentação é predominantemente carbonática e de granulometria grossa (Nascimento, 2011; Araújo et al., 2018). A clinoforma atual do delta foi formada após a estabilização do nível do mar em torno de 8-7,5 ka AP.

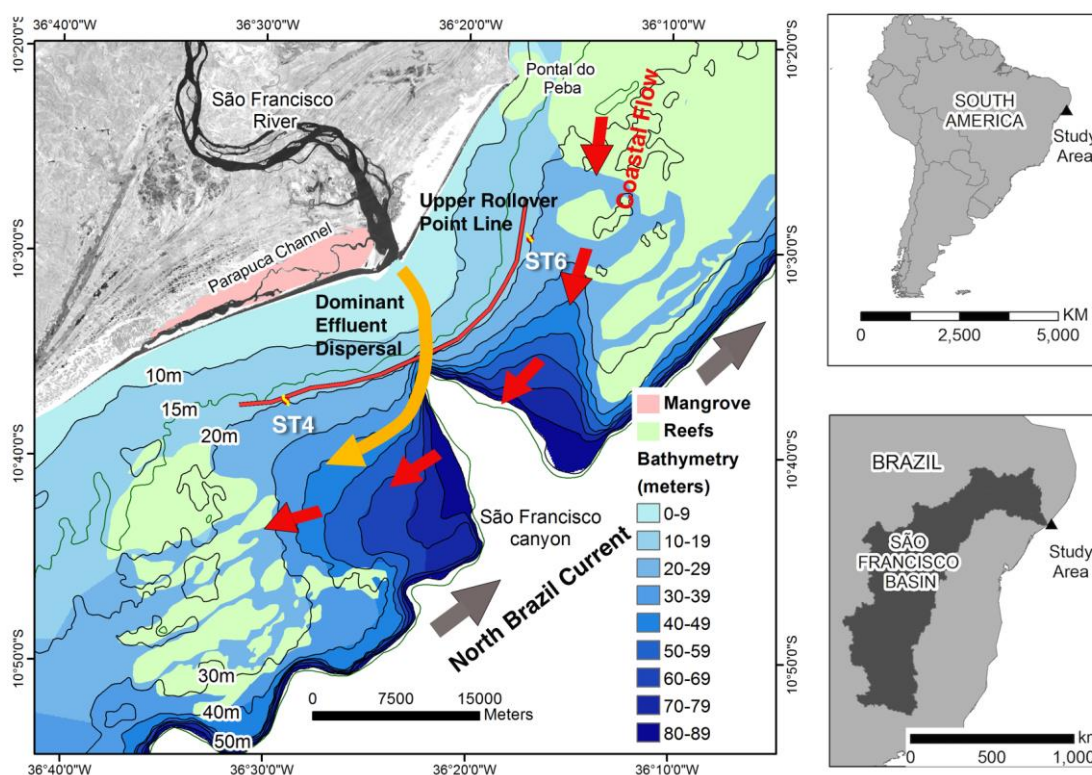
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Coleta de testemunhos

Dois testemunhos rasos foram coletados em janeiro de 2012, na clinoforma deltaica do RSF (Figura 1). O testemunho ST6 com 180 cm de comprimento foi coletado aproximadamente a uma distância de 1200 m a nordeste da foz e o ST4 com comprimento de 184 cm a uma distância de aproximadamente 1500 m a sudoeste da foz do rio, ambos em lâmina d'água de 20 m. A escolha desta profundidade de coleta deve-se ao fato de marcar a passagem do topset para o foreset da clinoforma. Este trecho denominado de rollover caracteriza-se por elevadas taxas de sedimentação (Donommee et al., 2018). Nos dois sítios de coleta foram adquiridas linhas sísmicas rasas de alta resolução utilizando-se uma fonte acústica do tipo CHIRP, operando em frequências de 2 e 16 kHz, cada uma com cerca de 500m de

comprimento, com o intuito de investigar a geometria interna dos sedimentos amostrados (Figura 1).

Figura 1: Localização da área de estudo e dos testemunho e linhas sísmicas coletadas.



3.2 Análises geoquímicas

Os testemunhos após abertos foram descritos e sub-amostrados, em intervalos de 2 cm, totalizando 90 amostras no testemunho ST4 e 92 no testemunho ST6. A granulometria foi determinada usando um difratômetro de partículas a laser (Modelo HORIBA LA950). A classificação das frações granulométricas foi realizada no aplicativo GRADISTAT V 5.0 (Blott and Pye, 2001).

As determinações de COT, NT, e da razão isotópica do ^{13}C foram realizadas em analisador elementar Costech acoplado a um espectrômetro de massa Thermo

Finigan. Os valores medidos estão referenciados ao padrão Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB). O teor de carbonatos totais no sedimento foi obtido por gravimetria. A razão C/N só foi calculada para os primeiros 100 cm de cada testemunho em função da não recuperação do NT nas amostras mais profundas, nas quais os valores estiveram abaixo do limite de detecção do método utilizado.

A determinação dos teores de Fe, Ti e Ca (para obtenção das razões Ti/Ca e Fe/Ca) foram feitas para intervalos de 10 cm. As amostras foram submetidas à digestão total dos sedimentos com ácido nítrico, em sistema de micro-ondas fechado, segundo metodologia ASTM (1992). A leitura dos valores foi feita por Espectrômetro de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado de Argônio – ICP-OES (Marca VARIAN, modelo M 4165).

3.3 Datações

A atividade do ^{210}Pb foi determinada apenas no testemunho ST6 de acordo com os procedimentos descritos por Godoy et al. (1998). O limite de detecção desta técnica é de 1 Bq kg^{-1} para o tempo de contagem de 1000 min (Gomes et al., 2009). A cronologia do núcleo foi determinada utilizando o modelo do Fluxo Constante – Taxa de Acumulação de sedimentos (CF:CS). No testemunho ST4 não foram realizadas análises de datação.

Ainda no testemunho ST6 foi datada por Carbono-14, uma amostra de fragmento de molusco bivalve retirada de uma profundidade de 170 cm. A datação foi realizada por Acelerador de Espectrometria de Massa (AMS), no Laboratório Beta Analytics na Flórida, EUA.

4 RESULTADOS

4.1 Perfis sísmicos

Em ambas estações de coleta os registros sísmicos apresentam sedimentos bem laminados com diferenças, entretanto, marcantes entre as duas estações.

Estação ST6 - nesta estação o sinal acústico penetrou cerca de 40m, sendo possível identificar três unidades sedimentares. As duas unidades inferiores (U1 e U2), apresentam refletores inclinados em torno de 1 grau em um arranjo tipicamente progradacional e resposta sísmica aproximadamente uniforme (Figura 2). A unidade 2 (U2) é truncada no topo por um refletor menos inclinado sobre o qual se depositou a unidade 3 (U3) que apresenta características bem distintas das anteriores. O testemunho ST6 amostrou essencialmente esta unidade 3. Esta unidade também apresenta internamente um acamamento bem marcado onde podem ser individualizadas 5 subunidades: 03 destas unidades apresentam uma geometria em cunha progradacional, que mergulha e afina no sentido de costa afora (U3pw1, U3pw2 e U3pw3). O topo e a base da unidade 3 são marcados por subunidades também com geometria em cunha (U3rw1 e U3rw2) que afinam no sentido de costa adentro onlapando na base a U2 e o no topo a subunidade U3pw3. Estas duas subunidades apresentam portanto um caráter mais retrogradacional. Deste modo as unidades U1 e U2 seriam indicativas de um comportamento mais progradacional da clinofoma deltaica refletindo maiores vazões do rio. De outro lado a acumulação da unidade 3, mostra uma mudança de regime na região, indicando um caráter mais episódico da deposição (cunhas progradacionais) antecedidas e sucedidas por cunhas de caráter retrogradacional e portanto de redução no aporte sedimentar (Figura 2).

Estação ST4 - nesta estação as ondas acústicas penetraram pouco mais de 2 metros no sedimento devido à presença de gás em profundidade impedindo a

propagação do sinal (Figura 3). Felizmente a região imageada englobou todo o pacote sedimentar amostrado pelo testemunho ST4. Embora a região imageada apresente um acamamento bem marcado, o mesmo apresenta uma geometria plano-paralela com os estratos exibindo uma boa continuidade lateral (Figura 3). Cunhas de sedimentos como aquelas verificadas na estação ST6 não foram individualizadas. Isto talvez resulte da orientação dos dois perfis em relação ao padrão de dispersão da pluma fluvial, longitudinal no ST6 e transversal no ST4.

Figura 2: A) Perfil sísmico raso de alta resolução adquirido transversalmente a costa, passando pelo ponto de coleta ST6. B) Interpretação do perfil. A linha vermelha representa o local do furo

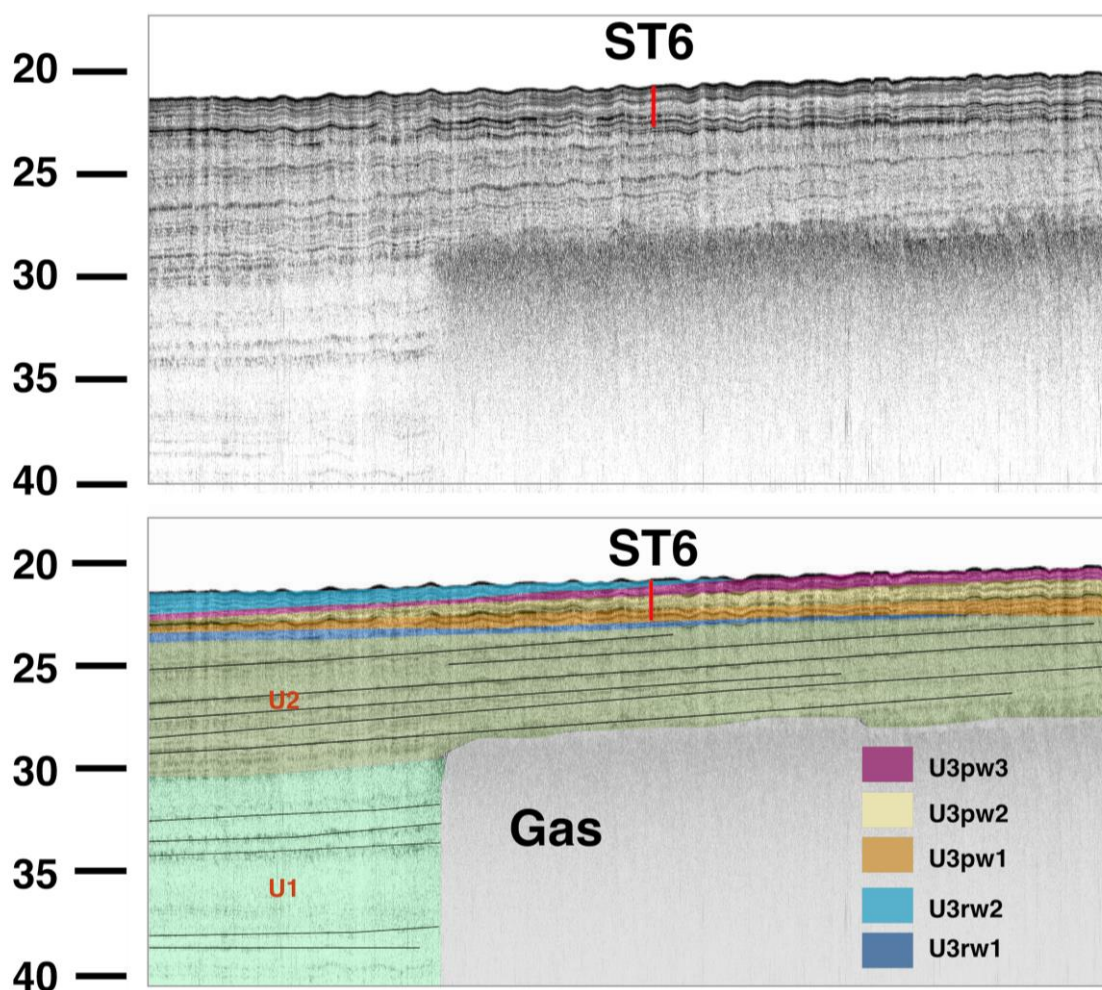
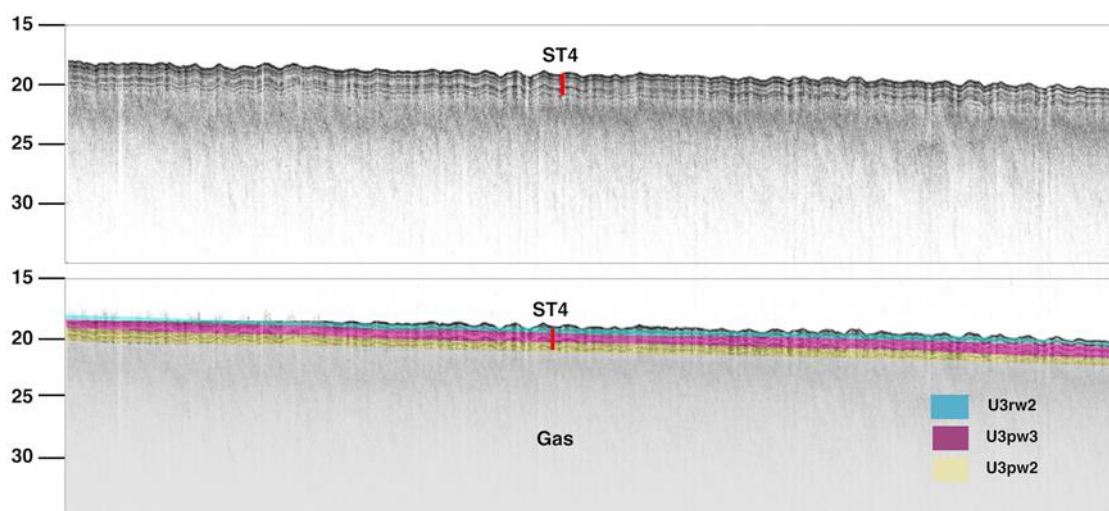


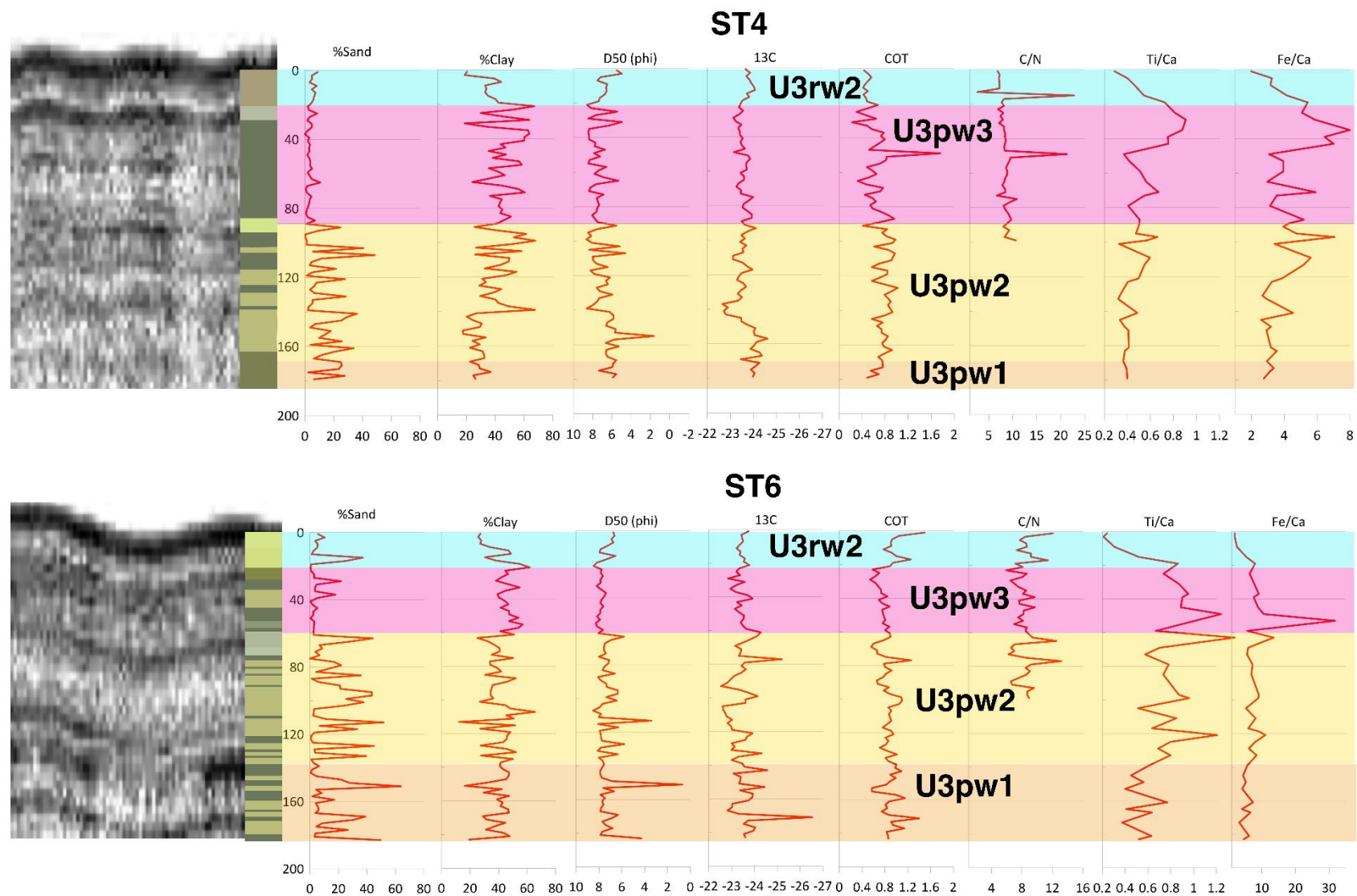
Figura 3: A) Perfil sísmico raso de alta resolução adquirido transversalmente a costa, passando pelo ponto de coleta ST4. B) Interpretação do perfil. Linha vermelha representa local do furo.



4.2 Textura do Sedimento

Ambos testemunhos apresentam um acamamento bem marcado expresso por variações de tons ocre e cinza-esverdeados e constituídos essencialmente por sedimentos lamosos (Figura 4). Os sedimentos no furo ST4 são ligeiramente mais finos que no ST6 (Figura 4). Observa-se, entretanto, uma abrupta diminuição nos teores de areia em direção ao topo de ambos os testemunhos nas profundidades de 90 cm (ST4) e 70 cm (ST6). De modo geral, as camadas com maiores teores de areia são também aquelas que apresentam uma coloração mais ocre, enquanto os sedimentos mais finos exibem cores mais cinza esverdeados (Figura 4). Estruturas de bioturbação não foram encontradas no sedimento. Verifica-se que existe uma boa correspondência entre os principais refletores nos registros sísmicos e as camadas amostradas nos testemunhos (Figuras 2, 3 e 4).

Figura 4: Distribuição dos parâmetros geoquímicos e texturais analisados ao longo dos testemunhos ST4 e ST6.



4.3 Análises geoquímicas

No testemunho ST4 a porcentagem média de COT foi de 0,69%, com os teores variando entre 0,23 até 1,76%. Contudo, apenas uma das amostras alcançou 1,76%, enquanto as demais estiveram sempre abaixo de 1,02% (Figura 4). De modo geral, os teores de COT neste testemunho variaram pouco, todavia é possível observar uma tendência de diminuição destes teores nos 40 cm superiores do testemunho.

No testemunho ST6 os teores de COT variaram entre 0,54 e 1,50%, com porcentagem média de 0,86% (Figura 4). Os valores foram portanto ligeiramente superiores quando comparados ao testemunho ST4. Além disso, os teores de COT tenderam a um aumento em direção ao topo. Como visto, os resultados para NT só foram recuperados para o primeiro metro de cada testemunho. No testemunho ST4 os valores de NT variaram entre 0,02 e 0,19% e no testemunho ST6 entre 0,06% e 0,13%, com valores médios de 0,07% e 0,01%, respectivamente (Figura 4). A análise estatística mostrou que o coeficiente da correlação de Spearman apresenta uma relação positiva e significativa entre o COT e o NT em ambos os testemunhos ($R_{ST4}=0,86$ e $R_{ST6}=0,62$), indicando portanto que este nitrogênio tem sua origem essencialmente orgânica.

Os valores do $\delta^{13}C$ variaram entre -24,61 ‰ até -22,65 ‰ no testemunho ST4, com valor médio de -23,62 ‰. As amostras mais depletadas em ^{13}C localizam-se na base do testemunho, nos 30 cm inferiores. No restante do testemunho estes valores permaneceram mais ou menos uniformes, com exceção de um intervalo com 8 cm, situado entre 138 e 145 cm de profundidade onde os valores de $\delta^{13}C$ variaram entre -22,65 a -22,80‰.

No testemunho ST6 os valores do $\delta^{13}C$ apresentaram um valor médio de -23,47 ‰ e uma maior amplitude de variação entre -26,54 ‰ e -22,54 ‰. Os valores de $\delta^{13}C$

nos 80cm superiores do testemunho ficaram próximos à média. No restante do testemunho são observados picos com excursões negativas. A razão C/N para os primeiros 100 cm de cada testemunho variaram entre 6,7 e 10,8, para o testemunho ST4 (valor médio de 8,3) e entre 5,9 e 13,1 para o testemunho ST6 (valor médio 8,4).

As razões Fe/Ca e Ti/Ca apresentam uma tendência de aumento no sentido do topo até uma profundidade de aproximadamente 40cm (36 cm no testemunho ST4, e 50 cm, no testemunho ST6), seguida por uma diminuição rápida até o topo dos testemunhos onde foram encontrados os menores valores. Uma correlação significativa, já esperada, foi encontrada entre as relações Fe/Ca e Ti/Ca em ambos os testemunhos ($R_{ST4}=0,95$ e $R_{ST6}=0,97$) (Arz et al., 1998, Arz et al., 1999; Burone et al., 2013). Os maiores valores das razões Fe/Ca e Ti/Ca estão associados principalmente à fração mais fina, em função dos maiores valores de Fe e Ti encontrados nas argilas.

De modo geral nos dois testemunhos, principalmente no ST6, observa-se uma boa correspondência entre % de areia e os valores de COT, da razão Ti/Ca e C/N, e uma relação negativa do % areia com os valores de $\delta^{13}C$ (Figura 4). No testemunho ST4, embora estas correspondências sejam também verificadas, não são tão notáveis como no ST6.

4.4 Cronologia

O estabelecimento de uma cronologia para os testemunhos não foi bem sucedida. No furo ST6, as análises com ^{210}Pb indicaram taxas de acumulação de 0,15 cm/ano. Em função disto os primeiros 20 cm deste testemunho teriam se acumulado em 133 anos. Já a datação com ^{14}C realizado de um fragmento de molusco encontrado na profundidade de 170cm deste furo forneceu uma idade de 145 anos, o

que resultaria em uma taxa de acumulação de 0,85 cm/ano. Para o testemunho ST4 como já mencionado não foi possível realizar qualquer tipo de datação.

5 DISCUSSÃO

O caráter da sedimentação deltaica é essencialmente episódico, acompanhando o comportamento sazonal da precipitação na bacia de drenagem e os diferentes períodos de recorrência das grandes cheias que alternam com períodos as vezes prolongados, de baixas vazões, como é o caso do RSF. Os sedimentos amostrados nos dois testemunhos e os registros sísmicos de alta resolução evidenciam este caráter episódico da sedimentação expresso no acamamento bem pronunciado e nos parâmetros geoquímicos analisados. Constata-se a existência de uma boa correspondência entre a cor dos sedimentos, %areia, razão Ti/Ca e Fe/Ca, COT e $\delta^{13}\text{C}$ (Figura 4), sugerindo um controle na distribuição vertical destes parâmetros por eventos de cheia do RSF.

A tendência geral da dispersão da pluma de sedimentos em suspensão do RSF é se expandir inicialmente para sul e depois ser defletida para SW pelo fluxo costeiro (Oliveira et al., 2012). Assim devido à sua localização a estação de coleta do ST6 só é diretamente afetada pela pluma durante as maiores cheias. Em comparação a estação de coleta do ST4, situada a jusante da foz, está sujeita a uma influência mais continuada da pluma fluvial. Esta estação encontra-se também mais afetada pela deposição de sedimentos oriundos da região costeira situada a nordeste da clinoforma e advectados para sudoeste pelos fluxos costeiros que contornam a clinoforma (Escobar et al., 2019).

No furo ST6 a distribuição vertical dos parâmetros geoquímicos e estruturais mostra que os picos de areia apresentam também valores de COT mais elevados,

valores de $\delta^{13}\text{C}$ mais negativos e razões Ti/Ca e Fe/Ca também maiores. Isto sugere que estes intervalos seriam indicativos de uma influência maior dos aportes fluviais (Arz et al., 1998; Arz et al., 1999; Burone et al., 2013; Perez et al., 2016). Maiores teores de Ti e Fe estão relacionados a um maior influxo de sedimento terrígeno (Arz et al., 1999), no entanto, as razões elementares Ti/Ca e Fe/Ca não refletem a quantidade de material terrígeno depositado, mas sim a contribuição relativa da entrada terrígena em relação às contribuições marinhas, indicadas pelo Ca (Govin et al., 2012).

A geometria prográdacional dos refletores sísmicos no ST6 corrobora esta interpretação, assim como o fato dos limites entre as três cunhas prográdacionais serem marcados por variações mais rápidas nos parâmetros geoquímicos e texturais medidos. O aumento progressivo da razão Ti/Ca no sentido do topo possivelmente é resultado do aumento no teor de finos (onde os valores de Ti e Fe são normalmente maiores) no mesmo sentido e não necessariamente há um aumento na contribuição fluvial. Finalmente nos 20 cm superiores do testemunho (subunidade U3rw2) ocorre uma rápida diminuição das razões Ti/Ca e Fe/Ca, as menores em todo o testemunho, acompanhado pelo aumento rápido no teor de silte o que, associado à geometria em onlap da subunidade U3rw2, sugere retrabalhamento e uma brusca redução nos aportes fluviais. De fato o padrão de empilhamento da subunidade U3pw3 sobre a subunidade U3pw2 é claramente retrogradacional. Neste sentido a subunidade U3pw2 representaria o evento prográdacional mais importante amostrado no testemunho ST6.

No testemunho ST4 a correspondência entre os diferentes parâmetros geoquímicos e texturais do sedimento ainda é verificada porém não tão marcada como no ST6. Os refletores no registro sísmico do local de coleta, como já mencionado,

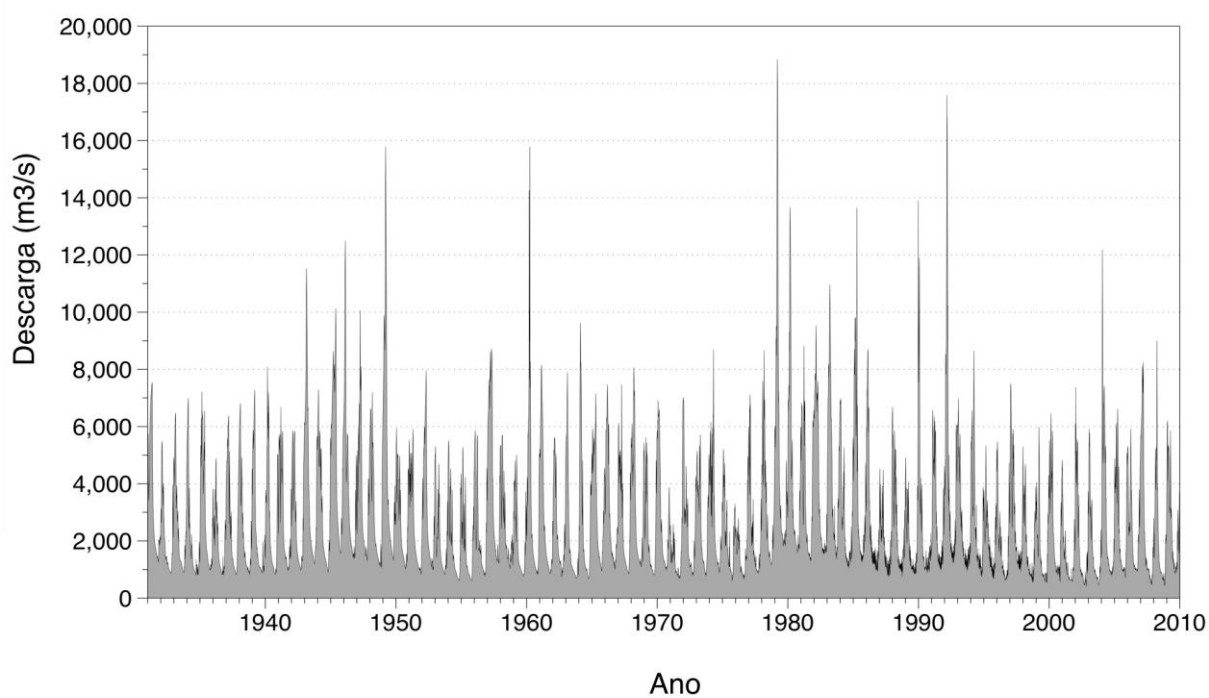
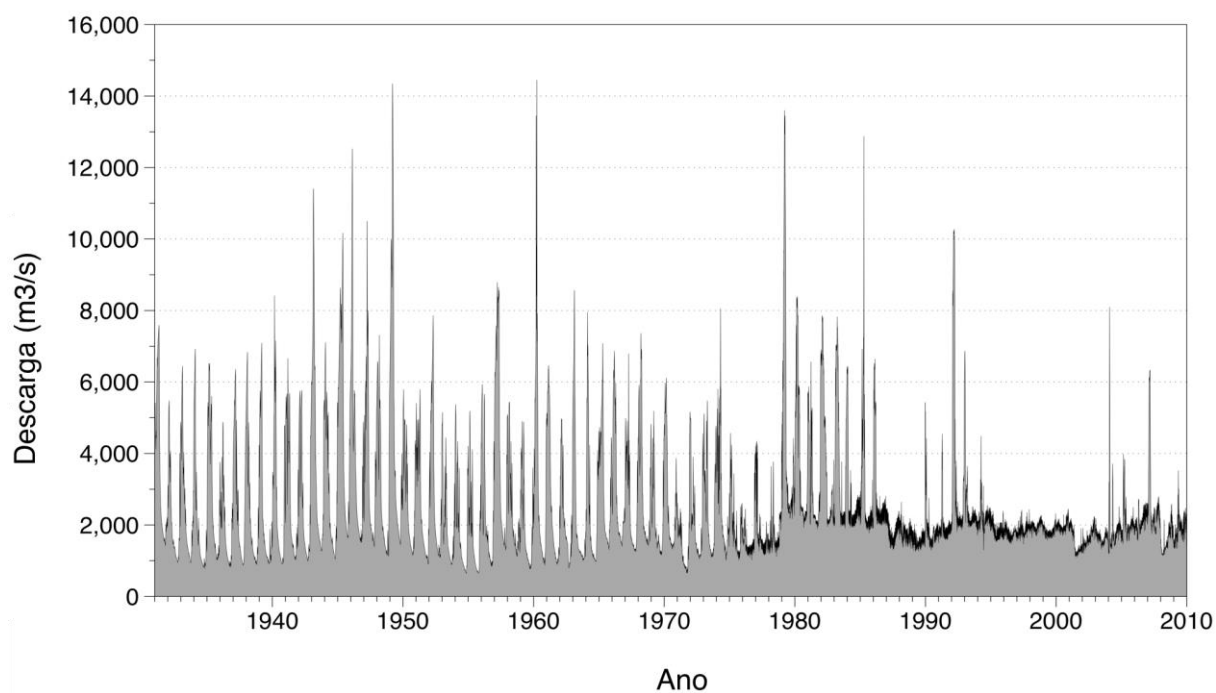
apresentam uma geometria plano-paralela, talvez pelo fato da linha sísmica estar orientada transversal ao sentido preferencial de dispersão da pluma fluvial. De modo geral, os valores dos parâmetros geoquímicos são semelhantes nos dois furos, embora o ST6 apresente uma maior variabilidade nestes parâmetros. Existe entretanto, uma leve tendência destes parâmetros serem ligeiramente menores no ST4 em comparação ao ST6, principalmente as razões Ti/Ca e Fe/Ca. Os valores mais negativos do $\delta^{13}\text{C}$ são também observados no ST6. Estes aspectos sugerem que o ST6 experimentou uma influência maior e mais variável do rio em comparação ao ST4 onde as condições foram mais uniformes. Esta maior uniformidade teria resultado do fato do ST4 ter estado, devido à sua localização, sob a influência mais continuada da pluma fluvial, mas também dos sedimentos advectados para sudoeste pelo fluxo costeiro principalmente sob condição de baixa vazão. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ encontrados em ambos os testemunhos de até -26 ‰ no ST6, indicam uma forte contribuição de MO terrestre, ainda que alguma mistura com fontes marinhas certamente tenha ocorrido a julgar pelos valores de C/N, nos 100 cm superiores dos dois testemunho. Esta mistura entretanto teria sido maior no ST4 por causa dos valores ligeiramente menos enriquecidos para o ^{13}C neste testemunho.

Importantes aspectos comuns aos dois testemunhos são uma diminuição brusca nos valores dos teores de areia e mediana em profundidades de 90cm no ST4 e 70cm no ST6, associada a qual se observa um aumento nas razões Fe/Ca e Ti/Ca, o que pode representar o efeito do aumento da fração fina no sedimento, sem implicar necessariamente em um aumento na contribuição fluvial. Nos 20 cm superiores de ambos os testemunhos ocorre uma diminuição rápida destas razões elementares, alcançando os valores mínimos no topo, associado a um aumento rápido na fração silte.

O RSF é caracterizado por um marcante contraste sazonal e interdecadal das precipitações (Novello et al., 2012; Knight et al., 2006). Genz e Luz (2012), analisando os registros de vazões para o rio entre 1934 e 2006 mostrou que a bacia apresentou mais anos secos e médios (57 anos) do que anos úmidos e muito úmidos (22 anos). Os períodos mais úmidos ocorreram entre 1943 e 1949 e entre 1979 e 1983, desde então até os dias atuais as vazões na desembocadura tem diminuído progressivamente como resultado de um decréscimo da precipitação na bacia hidrográfica, extração de água para diversos usos humanos e regularização das vazões (de Jong et al., 2018; Oliveira et al., 2012). Inicialmente para valores em torno de $1700\text{m}^3/\text{sec}$ e com valores progressivamente decrescentes a partir de 2013 chegando a algo em torno de $700\text{m}^3/\text{dia}$ em 2019 (ANA, 2019).

A hipótese com que aqui trabalhamos é que a brusca regularização da vazão do RSF, à partir do ano de 1987 é a causa principal da brusca diminuição da granulometria dos sedimentos nos dois testemunhos estudados. Nesta linha de raciocínio, a sub-unidade U3pw2, que no sítio ST6 apresenta a geometria de uma cunha progradacional corresponderia ao último período de grandes cheias que afetou o delta (1979-1983). Após este período com a regularização brusca das vazões mantidas artificialmente em $1700\text{m}^3/\text{ano}$ depositou-se a cunha U3pw3, que apresenta um empilhamento retrogradacional em relação a subunidade subjacente. Esta cunha pode ter se depositado no período 1986-1994, principalmente entre 1990 e 1994, quando ocorreu uma série de pequenas cheias porém de magnitude inferior àquelas do período 1979-1983 (Figura 5).

Figura 5 – Hidrograma com vazões médias diárias para o período 1930-2010 (Estação Piranhas). A) Vazão medida na foz do RSF. B) Vazão natural (sem efeito das barragens) na foz do RSF.



Após 1995 entrou-se no período mais prolongado de baixas vazões, durante o qual teria se depositado a subunidade U3rw2, apresentando uma geometria

retrogradacional onde os valores das razões elementares do Fe/Ca e Ti/Ca são os menores verificados ao longo de todo o testemunho.

É interessante observar que a deposição da subunidade U3pw2 é separada da subunidade U3pw1 sotoposta por um refletor bem marcado indicando uma descontinuidade na acumulação que poderia corresponder ao período de vazões reduzidas que antecedeu as grandes cheias do período 1979-1985. Neste sentido a subunidade U3pw1 representaria sedimentos depositados pré-1975, um período de vazões médias anuais decrescentes desde o período anterior chuvoso de 1943-1949, o que é corroborado nos dois testemunhos por menores razões elementares Fe/Ca e Ti/Ca. Infelizmente os testemunhos apresentaram uma penetração limitada e o suposto período 1975-1930 não pode ser documentado.

6 CONCLUSÃO

Os sedimentos amostrados nos dois testemunhos e os registros sísmicos de alta resolução evidenciam o caráter episódico da sedimentação na clinofoma deltaica do RSF, expresso no acamamento bem pronunciado e nos parâmetros geoquímicos analisados. O aumento da deposição de sedimentos mais grossos associado a valores mais altos das razões elementares indicativas de contribuição terrígena foram interpretados como períodos de aumento do suprimento de sedimentos para a plataforma, relacionado as inundações do RSF. No testemunho ST6 estas relações são muito bem marcadas em função de sua localização em relação a pluma do rio, enquanto no ST4 o caráter da sedimentação e parâmetros geoquímicos são mais uniformes, em função da contínua ação da pluma, longitudinalmente.

Os perfis sísmicos analisados permitiram identificar as mesmas unidades sismoestratigráficas em ambos os testemunhos (U3pw1, U3pw2, U3pw3 e U3rw2).

Em função da maior penetração do sinal no furo ST6, foram ainda identificadas duas Unidades (U1 e U2) mais profundas, com comportamento progradacional que remete a períodos de maiores vazões do RSF. A análise combinada dos parâmetros geoquímicos e das unidades identificadas nos testemunhos permitiram, junto aos dados de precipitação na bacia hidrográfica, identificar os possíveis períodos de deposição de cada sub-unidade da Unidade 3. A unidade mais basal (U3pw1), com caráter progradacional foi possivelmente depositado pré-1975, a unidade U3pw2, que representa a mais relevante sedimentação fluvial, caracterizada principalmente pela maior quantidade de areia e pelo aumento dos teores de Ti/Ca e Fe/Ca, foi provavelmente depositada durante as grandes cheias do período 1979-1985. A unidade subsequente, U3pw3, depositou-se possivelmente entre 1986-1994, quando as vazões já encontravam-se regularizadas e o rio experimentou cheias isoladas entre 1990-1994. A última unidade depositada, U3rw2, com características retrogradacionais, teria sido depositada quando o RSF já apresentava as vazões totalmente regularizadas e experimentava períodos cada vez mais secos na bacia hidrográfica, incorporando assim os impactos da cascata de barragens e das mudanças climáticas em sua bacia hidrográfica.

Agradecimentos:

This paper is a contribution of the following research grants: CAPES/PNPD (No. 2983/2010) and inctAmbTropic, CNPq/FAPESB (No. 565054/2010-4, 8936/2011 and **465634/2014-1**).

7 REFERÊNCIAS

- ANA - Agência Nacional de Águas (2019) Controle da vazão. Monitoramento de reservatórios e sistemas hídricos. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua/reservatorios-e-sistemas-hidricos>
- Araujo HAB de, Dominguez JML, Machado A de J, Rangel AG de AN (2018) Benthic foraminifera distribution in a deltaic clinoforn (São Francisco Delta, eastern Brazil): A reference study. *J Mar Syst*
- Arz HW, Pätzold J, Wefer G (1998) Correlated Millennial-Scale Changes in Surface Hydrography and Terrigenous Sediment Yield Inferred from Last-Glacial Marine Deposits off Northeastern Brazil. *Quat Res* 50:157–166
- Arz WH, Pätzold J, Wefer G (1999) Climatic changes during the last deglaciation recorded in sediment cores from the northeastern Brazilian Continental Margin. *Geo-Marine Lett* 19:209–218
- ASTM (1992) Manual on descriptive analysis testing. MNL 13, R. Hootman. ed ASTM, West Conshohocken, Penn.
- Bianchi TS, Allison MA (2009) Large-river delta-front estuaries as natural “recorders” of global environmental change. *Proc Natl Acad Sci U S A* 106:8085–8092. doi: 10.1073/pnas.0812878106
- Bittencourt ACSP, Dominguez JML, Martin L, Ferreira YA (1982) Dados Preliminares sobre evolução do delta do Rio São Francisco (SE/AL) durante o quaternário:

influência das variações do nível do mar. Atas do VI Simpósio do Quaternário no Bras 46–68

Bittencourt ACSP, Dominguez JML, Martin L, Silva IR. (2005). Longshore transport on the northeastern Brazilian coast and implications to the location of large scale accumulative and erosive zones: an overview. *Marine Geology*. 219: 219-234

Blott SJ, Pye K (2001) Gradistat: a grain size distribution and statistic and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes Landforms*. 26: 1237–1248.

Brasil, Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos (2006) Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco. 148p.

Burone L, Ortega L, Franco-fraguas P, et al (2013) A multiproxy study between the Río de la Plata and the adjacent South- western Atlantic inner shelf to assess the sediment footprint of river vs. marine influence. *Cont Shelf Res* 55:141–154. doi: 10.1016/j.csr.2013.01.003

Carlin JA, Dellapenna TM (2014) Event-driven deltaic sedimentation on a low-gradient, low-energy shelf: The Brazos River subaqueous delta, northwestern Gulf of Mexico. *Mar Geol* 353:21–30. doi: 10.1016/j.margeo.2014.03.017

Chaves RR, Cavalcanti IFA (2001) Atmospheric Circulation Features Associated with Rainfall Variability over Southern Northeast Brazil. *Mon Weather Ver*. 129:2614–2626. doi: 10.1002/bies.201300007

Correa J, Fioreze A, Mendonca B, Pinto C, Coimbra M. (2012). A bacia hidrográfica do Rio São Francisco: usos, balanço hídrico, gestão e desafios. In *A Questão da*

Água no Nordeste. Agência Nacional de Águas – Ministério do Meio Ambiente: Brasília.

de Jong P, Tanajura CAS, Sánchez AS, et al (2018) Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. *Sci Total Environ* 634:1540–1553. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.03.256

Denomme KC, Bentley SJ, Harazim D (2018) Mechanisms of muddy clinothem progradation on the Southwest Louisiana Chenier Plain inner shelf. *Geo-Marine Lett* 38:273–285

Dominguez JML (1996) The São Francisco Strandplain: a paradigm for wave-dominated deltas? In: De Batist, M.; Jacobs P (ed) *Geology of Siliciclastic Shelf Seas*. London, England. 117: 217–231.

Dominguez JML, Binttencourt ACSP, 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*, São Paulo. 13: 98-105.

Escobar NFC, Dominguez JML, Zucchi MR, Azevedo AEG, Rebouças RC, Rangel AGAN (2019) Source and distribution of organic matter in a deltaic clinoform: the case of the São Francisco River (NE Brazil). *Geo-Marine Letters*. (No prelo).

Genz F, Luz LD (2012) Distinguishing the effects of climate on discharge in a tropical river highly impacted by large dams. *Hydrol Sci J* 57:1020–1034. doi: 10.1080/02626667.2012.690880

- Govin A, Holzwarth U, Heslop D, Ford Keeling L, Zabel M, Mulitza S, Collins J, Chiessi C (2012). Distribution of major elements in Atlantic surface sediments (36°N-49°S): Imprint of terrigenous input and continental weathering. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 13(1): 1-23.
- Guimarães JK (2010) Evolução do delta do rio São Francisco - estratigrafia do Quaternário e relações morfodinâmica. Douctoral Thesis, Bahia, Brazil, 118.
- Knight JR, Folland CK, Scaife AA (2006) Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Geophys reserch Lett* 33:2–5. doi: 10.1029/2006GL026242
- Knoppers B, Medeiros PRP, De Souza WFL, Jennerjahn T (2006) The São Francisco estuary, Brazil. *Handb Environ Chem. Water Pollut* 5:51–70. doi: 10.1007/698-5-026
- Marengo JA, Bernasconi M (2015) Regional differences in aridity / drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. *Clim Change* 129:103–115. doi: 10.1007/s10584-014-1310-1
- Marengo JA, Torres RR, Alves LM (2016) Drought in Northeast Brazil - past, present and future. *Theor Appl Climatol* 20:1–12. doi: 10.1007/s00704-016-1840-8
- Medeiros PRP, Knoppers B a, Cavalcante GH, de Souza WFL (2011) Changes in Nutrient Loads (N, P and Si) in the Sao Francisco Estuary after the Construction of Dams. *Brazilian Arch Biol Technol* 54:387–397. doi: 10.1590/S1516-89132011000200022
- Medeiros PRP, Santos MM Dos, Cavalcante GH, et al (2014) Características ambientais do Baixo São Francisco (AL/SE): efeitos de barragens no transporte

de materiais na interface continente-oceano. *Geochim Bras* 28:65–78. doi: 10.5327/Z0102-9800201400010007

Mendes I, Lobo FJ, Fernández-Salas LM, et al (2015) Multi-proxy evidence of rainfall variability recorded in subaqueous deltaic deposits off the Adra River, southeast Iberian Peninsula. *Estuar Coast Shelf Sci* 167:300–312. doi: 10.1016/j.ecss.2015.08.005

Mendes I, Rosa F, Dias JA, et al (2010) Inner shelf paleoenvironmental evolution as a function of land-ocean interactions in the vicinity of the Guadiana River, SW Iberia. *Quat Int* 221:58–67. doi: 10.1016/j.quaint.2009.10.037

Milliman JD, Meade RH (1983). Worldwide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology* 91, 1–21.

Milliman JD. (1975) Upper continental margins sedimentation off Brazil: Part VI. A synthesis. *Contrib. Sedimentol.* 4: 151-176.

Molion L, Bernardo O (2002). Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. *Rev. Brasil. Meteorol.* 17: 1–10.

Nascimento AA (2011) Sedimentação Holocênica na Plataforma Continental de Sergipe, Nordeste do Brasil. Dissertação de Mestrado. Salvador, Bahia. 105p

Nittrouer CA, Austin JA, Field ME, Kravitz JH, Syvitski JM, Wiberg PL (2009) Continental margin sedimentation: from sediment transport to sequence stratigraphy. New York: Wiley Blackwell.

- Nittrouer CA, Sternberg RW (1981) The formation of sedimentary strata in an allochthonous shelf environment: The Washington continental shelf. *Marine Geol.* 42: 201-232.
- Novello VF, Cruz FW, Karmann I, Burns SJ, Stríkis NM, Vuille M, et al (2012) Multidecadal climate variability in Brazil's Nordeste during the last 3000 years based on speleothem isotope records. *Geophys reserch Lett* 39:1–6. doi: 10.1029/2012GL053936
- Oliveira EN, Knoppers BA, Lorenzetti JA (2012) A Satellite View of Riverine Turbidity Plumes on the Ne-E Brazilian Coastal Zone. *Brazilian J Oceanogr* 60:283–298
- Pereira SB, Pruski FF, Silva DD da, Ramos MM (2007) Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. *Rev Bras Eng Agrícola e Ambient* 11:615–622. doi: 10.1590/S1415-43662007000600010
- Perez L, García-rodríguez F, Hanebuth TJJ (2016) Variability in terrigenous sediment supply offshore of the Río de la Plata (Uruguay) recording the continental climatic history over the past 1200 years. *Clim Past* 12:623–634. doi: 10.5194/cp-12-623-2016
- Rangel AGAN, Dominguez JML (2019) Antecedent topography controls preservation of late quaternary transgression record and clinorform geometry: the São Francisco Delta (East-Northeastern). *Geo-Marine Letters* (No prelo).
- Rangel AGAN, Dominguez JML (2015) Sedimentation and depositional architecture of the delta of the São Francisco River using high-resolution seismic data. 14th Int Congr Brazilian Geophys Soc EXPOGEF, Rio Janeiro, Brazil.

- Summerhayes CP, Fainstein R, Ellis JP (1976) Continental margin off Sergipe and Alagoas, northeastern Brazil: A reconnaissance geophysical study of morphology and structure. *Mar Geol* 20:345–361. doi: 10.1016/0025-3227(76)90112-2
- Syvitski JPM (2003) Supply and flux of sediment along hydrological pathways: Research for the 21st century. *Glob Planet Change* 39:1–11. doi: 10.1016/S0921-8181(03)00008-0
- Syvitski, J.P.M., Vorosmarty, C.J., Kettner, A.J., Green, P., 2005. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science* 308 (5720), 376–380
- Syvitski, JPM (2008) Deltas at risk. *Sust. Sci.* 3: 23–32. doi:10.1007/s11625-008-0043-3
- Vörösmarty CJ, Meybeck M, Fekete B, et al (2003) Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments. *Glob Planet Change* 39:169–190. doi: 10.1016/S0921-8181(03)00023-7
- Wheatcroft RA, Borgeld JC, Born RS, et al (1996) The anatomy of an oceanic flood deposit. *Oceanogr Dc-Oceanography Soc* 9:158–162. doi: 10.5670/oceanog.1996.03
- Zhou J, Lau KM (2001) Principal modes of interannual and decadal variability of summer rainfall over South America. *Int J Climatol* 21:1623–1644. doi: 10.1002/joc.700

CAPÍTULO 4

CONCLUSÃO GERAL

Este estudo mostrou de maneira conjunta, a partir da análise de sedimentos superficiais e de testemunhos rasos, características da sedimentação recente na clinofoma deltaica do rio São Francisco. A importância de estudos de referência baseados em uma grade amostral detalhada e uniforme, integrada com dados geológico e geomorfológicos locais, que permitiram no primeiro artigo identificar as diferentes fontes da matéria orgânica nos sedimentos superficiais da clinofoma deltaica. As províncias da clinofoma deltaica do São Francisco (regiões de topset, foreset e bottomset) e áreas vizinhas fornecem um mosaico de tipos de fundos, que combinado ao transporte de material pela pluma fluvial e pelo padrão de dispersão das correntes costeiras, imprimem diferentes assinaturas na distribuição da matéria orgânica.

No segundo artigo, a análise multi-parâmetro dos sedimentos de dois testemunhos e os registros sísmicos de alta resolução evidenciou o caráter episódico da sedimentação na clinofoma deltaica do São Francisco, acompanhando o comportamento sazonal da precipitação na bacia de drenagem. Além disso, diferentes padrões de sedimentação foram verificados nos diferentes sítios de coleta, em função do comportamento geral da pluma do rio. O testemunho ST6 refletiu melhor as grandes cheias do rio, enquanto o furo ST4 mostra um comportamento mais uniforme, ligada a influência mais continuada da pluma fluvial. A geometria dos refletores sísmicos corrobora esta interpretação. Os registros sísmicos mostraram as mesmas unidades sismoestratigráficas em ambos os testemunhos. Em ambos os testemunhos o aumento do teor de finos em direção ao topo acompanhada dos baixos teores da

razão Fe/Ca e Ti/Ca foram interpretados como consequências da brusca regularização da vazão do rio São Francisco a partir de 1986, pela instalação de barramentos e em função da diminuição da precipitação na bacia de drenagem.