



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA – CCET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA
E GEOFÍSICA – PPGG

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**A PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO SÃO FRANCISCO: Retrabalamento costeiro,
formas de leito, vazão e clima**

Autor:

DIEGO D' AVILA BESERRA

Orientadora:

Dra. HELENICE VITAL (DG/PPGG/UFRN)

Co-orientador:

Dr. André Giskard Aquino da Silva (UFRN)

Dissertação nº 221/PPGG

NATAL/RN
DEZEMBRO DE 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA – CCET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA
E GEOFÍSICA – PPGG

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DIEGO D' AVILA BESERRA

**A PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO SÃO FRANCISCO: Retrabalhamento costeiro,
formas de leito, vazão e clima**

Dissertação nº 221/PPGG apresentada no dia 21 de dezembro de 2018, ao Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, PPGG, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, para obtenção do título de Mestre em Geodinâmica e Geofísica, com área de concentração em Geodinâmica.

Orientadora: Dra Helenice Vital

Co-orientador: André Giskard Aquino da Silva

Comissão Examinadora:

Profa. Dra. Helenice Vital (PPGG/UFRN) – Presidente/Orientadora

Prof. Dr. Werner Farkatt Tabosa (UNI-RN) – Membro Externo

Prof. Dr. Moab Praxedes Gomes (PPG/UFRN) – Membro Interno

NATAL/RN

DEZEMBRO DE 2018

Dedico este trabalho a minha esposa. Por todo apoio, suporte e inspiração.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof. Ronaldo Xavier de Arruda - CCET

Beserra, Diego D'Avila.

A planície costeira do Rio São Francisco: retrabalhamento costeiro, formas de leito, vazão e clima / Diego D'Avila Beserra. - 2018.

57f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Natal, 2018.

Orientadora: Helenice Vital.

Coorientador: André Giskard Aquino da Silva.

1. Geodinâmica - Dissertação. 2. Dinâmica costeira - Dissertação. 3. Formas de fundo - Dissertação. 4. Sonar de varredura lateral - Dissertação. 5. Delta - Dissertação. I. Vital, Helenice. II. Silva, André Giskard Aquino da. III. Título.

RN/UF/CCET

CDU 551.2/.3

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), através do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) e do Laboratórios de Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental (GGEMMA), pela infraestrutura disponibilizada.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 pela concessão da Bolsa de Mestrado, e aos projetos e órgãos que financiaram esta pesquisa: Cooperação Brasil – Alemanha "Northern Brazilian river deltas: River impacts versus pristine discharge" (CAPES, DAAD, DFG), Auxílio PQ Margem Equatorial Brasileira: Da Fonte a Deposição (Processo nº 311413/2016-1, Chamada CNPq nº 12/2016), e INCT AmbTropic – Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia "Ambientes Marinhos Tropicais" (Heterogeneidade Espaço-Temporal e Respostas a Mudanças Climáticas (CNPq – FAPESB – CAPES).

É inevitável não olhar para trás e lembrar o que passamos quando finalizamos um objetivo que durou mais de dois anos. Em dois anos passamos por várias situações de dificuldades, stress e dúvidas. É essencial ter pessoas próximas para contar nessas situações. Foram muitas pessoas envolvidas para que eu conseguisse terminar essa dissertação de Mestrado, essas pessoas foram importantes no auxílio de questões técnicas, pessoais e emocionais. Assim, a conclusão deste trabalho não seria possível sem o apoio destas pessoas.

Ao longo desses dois anos passei por algumas situações que poderiam me fazer desistir deste objetivo, foram muitas dúvidas e decisões a serem tomadas, tais como abrir mão do Mestrado em detrimento de uma ou outra proposta de emprego bem como a dúvida se novos empregos apareceriam neste momento de dificuldade que estamos vivendo. A gente acaba adiando planos pessoais sem saber se novas oportunidades vão surgir. Mas como disse Augusto Cury em um de seus livros: "Toda escolha envolve uma perda e, se não podemos perder o trivial, não somos dignos de ganhar o essencial."

Eu me considero uma pessoa muito sortuda por ter tantas pessoas especiais por perto, são tantas pessoas que, muito provavelmente, farei a injustiça de esquecer de citar alguém. Boa parte dessas pessoas estão no laboratório de Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental (GGEMMA), outros são do PPGG ou

do Departamento de Geologia, tem os antigos amigos geológicos, do tempo da graduação, os amigos do IFRN e, por fim, a família que me apoia desde o início e continuará por todo o tempo.

Os amigos do GGEMMA foram muito importantes tanto em relação às discussões técnicas quanto pela amizade sincera, dentre vários nomes posso citar: João Paulo, Vanessa, Francisco Nicodemos, Francisco Canindé, Werner, Myrli, Andressa, Moab, Francisco Cordeiro, Isabele, Júlia, Fernando, Thiago, Tiago, Kaio, Pedro, Samir, Alany Flávia, Úrsula. Fora do GGEMMA, mas ainda no PPGG, posso citar, Paulo Ívison (um grande amigo), Alysson e Rafaela. Os professores do PPGG e do DGEO: Moab, Hilário, Cordeiro, Vanildo, Galindo, Oliveira, Narendra, Venerando dentre outros.

Alguns dos meus grandes amigos geológicos, do tempo da graduação, puderam contribuir mesmo de mais longe: Gustavo Rocha, Arthur Victor, Thiago Aquino e Thales.

Um agradecimento especial a minha orientadora Professora Dra. Helenice Vital e ao meu Co-orientador Dr. André Giskard. A professora Helenice é uma pessoa muito especial para todos nós e que serve de inspiração pelo seu conhecimento e dedicação aos alunos e ao trabalho, já o André, é um grande profissional e amigo que tem o dom de ajudar e ensinar todos os alunos.

Não posso deixar de citar os amigos de trabalho no IFRN, foram apenas cinco meses trabalhando como professor, mas o suficiente para fazer boas amizades, não posso deixar de citar: Arthur Victor, Alexandre Rocha da Rocha, Ana Paula, Tatiane, Leão Neto, Ronaldo Diniz e vários alunos que viraram colegas.

A família é o mais importante, ela é a minha base e sempre me deu todo o suporte necessário. O agradecimento especial vai para os meus pais, os meus sogros, a minha irmã a minha cunhada e, por último, a minha esposa Talita que, há 12 anos, divide comigo todos os nossos planos, sonhos e dificuldades.

Por fim, não poderia deixar de agradecer a Deus, por ter permitido tudo isso acontecer, me dando saúde, oportunidades e colocando todas essas pessoas no meu caminho.

“Quem não estiver preparado para perder o trivial não é digno de conquistar o essencial. E, se formos amigos da sabedoria, descobriremos que o essencial são as pessoas que amamos.”

(Augusto Cury)

RESUMO

O rio São Francisco está localizado no nordeste do Brasil e é o maior rio inteiramente brasileiro. Este rio tem sido afetado por retrabalhamento costeiro com tempos de severa erosão costeira. As mudanças sofridas pela linha de costa têm sido atribuídas a mudanças antrópicas, a exemplo da construção das barragens. O objetivo deste trabalho é entender os fatores que controlam as mudanças de curto prazo que afetam a linha de costa deste rio. Para isto, foram utilizadas imagens de satélites de diferentes períodos (Landsat 7 ETM+, para 2009 e 2012 e Landsat 8 OLI para 2017), dados sonográficos e de sísmica rasa dos anos de 2009 e 2012, hidrodinâmicos e sedimentológicos (do ano de 2009), bem como dados históricos de chuvas, vazão do rio, Índice Oceânico El Niño (ONI, em inglês), e de eventos de Zona de convergência Atlântico Sul (ZCAS). Esse conjunto de dados foram processados, analisados e integrados, com o intuito de identificar correlações com as variações na linha de costa. Os resultados obtidos mostraram que as formas de fundo não sofreram mudanças significativas, indicando que no período estudado o rio ainda estava transportando uma quantidade suficiente de sedimentos para a costa. Os eventos de ZCAS apresentaram mais influência nas chuvas do que os eventos ONI. A interferência antrópica através de barragens exerceu maior influência nas mudanças da linha de costas do que os regimes de chuvas. Indicam ainda que o Rio São Francisco é o principal provedor de sedimentos para a costa, dessa forma, este rio irá sempre encontrar um novo ponto de equilíbrio quando a sua descarga for controlada.

Palavras chaves: Dinâmica Costeira; Formas de fundo; Sonar de varredura lateral; Delta.

ABSTRACT

The São Francisco River is located in northwestern Brazil and is the longest river that runs entirely within the country of Brazil. This river has been greatly affected by coastline retreat, with a history of severe coastline erosion. These changes in the coastline have been attributed to anthropogenic changes such as the construction of dams. The purpose of this study is to understand what factors control short-term changes in the coastline of this river. Three separate satellite images were used, and the coastlines were drawn for the time periods of each cruise: 2009, 2012 and 2017. The lines were drawn using Landsat 7 ETM+ scenes for 2009 and 2012 and with Landsat 8 OLI scenes for 2017. Accretion and erosion were calculated, as well as the accretion/erosion ratio for areas northeast and southwest of the São Francisco River Mouth. Sonographic and seismic data were acquired from 2009 and 2012 to identify the changes in bedforms during those periods. The sonographic data were acquired using a Side Scan Sonar model 272-TD from Edgetech, and seismic data were acquired using a parametric sub-bottom profiler model SES 2000 from Innomar Technologie. Hydrodynamic data were acquired in 2009 using an Acoustic doppler current profiler (ADCP) to understand the behavior of the river mouth. Sediment samples from 2009 were collected with a Van Veen Grab to analyze sediment distribution in the area. Additionally, historical data regarding rainfall, river runoff, Oceanic Nino Index (ONI) events and South Atlantic Convergence Zone (SACZ) events were obtained to find any correlations with coastal changes. The analyzed and processed data showed that the bedforms had not undergone any significant changes, indicating that the river was still transporting enough sediments to the coast. The SACZ events had a greater influence on the rainfall regime than ONI events. However, the anthropogenic interference of rivers dams also had a greater influence on coastline changes than rainfall regimes. We therefore conclude that the São Francisco River is the main provider of sediment to the coast; in this way, this river will always find a new equilibrium when its discharge is controlled.

Key Word: Costal Dynamics; Bedforms; Side scan sonar; Delta.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da planície costeira do Rio São Francisco (área de estudo).	14
Figura 2: Esquema evolutivo da Planície Costeira do São Francisco, desde o Último Máximo Glacial (UMG) até os dias atuais.	16
Figura 3: Clima da área de estudo de acordo com a classificação de Nimer (1979).17	
Figura 4: Classificação climática do Brasil.....	18
Figura 5: Precipitação média mensal na área de estudo.	18
Figura 6: Variações de temperatura na área de estudo. Em A: Temperatura mensal mínima. Em B: Temperatura mensal máxima.	19
Figura 7: Temperatura média mensal na área de estudo.....	19
Figura 8: Direção média dos ventos na área estudada.	20
Figura 9: Intensidade média dos ventos na área estudada.	20
Figura 10: Extinção da vila do cabeço devido ao retrabalhamento costeiro. O farol presente nas três fotos pode ser tomado como referência. A: ano de 1994. B: ano de 1998. C: ano de 2010	22
Figura 11: Figura mostrando como o dado é adquirido a partir do sonar de varredura lateral.	26
Figura 12: Comparação entre o espalhamento (backscattering) em superfícies lisas e rugosas.	27
Figura 13: ADCP em diferentes formas de medição, da esquerda para a direita, numa boia, no navio e no fundo	28
Figura 14: Embarcação utilizada na aquisição dos dados	29
Figura 15: Sonar de varredura lateral utilizado para a coleta de dados. A) e B) veículo rebocável (<i>town fish</i>) respectivamente na embarcação e na água, C) Aquisição do dado em tempo real.	30
Figura 16: ADCP modelo Rio Grande da RDI utilizado neste estudo. A) sensor na água; B) sensor a bordo.	30
Figura 17: Amostragem sedimentológica. A) Sedimento coletado; B) Draga Van-Veen; C) Desenho esquemático da coleta de sedimento.....	31
Figura 18: Perfilador de subfundo modelo SES 2000 da Innomar Technologie. Em A: o equipamento dentro da caixa de transporte, em B: o equipamento montado em	

uma estrutura de metal, pronto para ser fixado na lateral da embarcação e em C: Tela mostrando o dado sendo adquirido em tempo real	31
Figura 19: Dados hidrodinâmicos do ADCP. Em A: os dados sendo exportados como ASCII a partir do software WinRiver II, em B: Dados já exportados e formatados sendo visualizados no Excel.	32
Figura 20: Processamento dos dados no Reflexw e Excel. Em A: Inserção de pontos nas crista e calhas das dunas. Em B: Dados de A exportados para o Excel para calcular altura e espaçamento das dunas.	34
Figura 21: Perfis sísmicos com superfície de migração marcada em amarelo. O volume de sedimento acima dessa superfície foi calculado.	34
Figure 1: Location map zoomed-in at the imaged area by the side scan sonar represented by the sonograms plotted on map.	37
Figure 2: Landsat Composition. A: 2009 image Landsat 7 ETM+ R7G4B2; B: 2012 image Landsat 7 ETM+ R7G4B2; C: 2017 image Landsat 8 OLI R7G5B3	40
Figure 3: Variety of bedforms in the area. A: Very large 2D dunes with small dunes superimposed; B: Very large 3D dunes with small dunes superimposed; C: Small to medium 2D dunes; D: plan bed on left side and ripples and small dunes on right side; E: Small dunes close to the river mouth showing flood asymmetry.	41
Figure 4: Bedforms comparison between 2009 and 2012. A: Upstream portion. B: Center of the area. C: Downstream portion	42
Figure 5: Graphic of flow direction and flow speed in m/s. A) Flood phase. B) Ebb phase.	43
Figure 6: Variations in flow velocities according to river side	43
Figure 7: ADCP profile showing current velocity variations according to depth. Velocities are increased in greater depths.	44
Figure 8: Monthly rainfall data extracted from INMET - National Institute of Meteorology of Brazil.....	44
Figure 9: Monthly average discharge in Propriá-AL. The red dots are the discharge values for the periods of data acquisition. (Data extracted from ANA – Nation Agence of Water – Brazil).....	44
Figure 10 - Time series of annual average rainfall, annual average river discharge, El-Niño and South Atlantic Convergence Zone.	44

Figure 11: Coast line trace (from 2009 to 2012) showing areas of erosion (red color) and accretion (green color), as well as the quantification of erosion and accretion in the study area. SW and NE are the sides according to the river mouth, and Bar is the sand bar in front of the river mouth.....46

Figure 12: Coast line trace (from 2012 and 2017) showing areas of erosion (red color) and accretion (green color), as well as the quantification of erosion and accretion at the studied area. SW and NE are the sides according to the river mouth, and Bar is the sand bar in front of the river mouth.....46

Figure 13: Bedform comparisons between profiles on the east side of the river. The map shows the location of profiles A (year 2009) and B (year 2012). The table shows the bedform measurements for each year.....47

Figure 14: Bedform comparisons between profiles on the west side of the river. The map shows the location of profiles C (year 2009) and D (year 2012). The table shows the bedform measurements for each year.....47

Figure 15: Sediment delimited above the migration surface to calculate the area. In A: 2009 data in B: 2012 data. A and B represent the same place.48

Figure 16: Scatter plot of Dune height versus dune spacing for 2009 and 2012, plotted over (Flemming, 2000) data.....48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Barragens construídas ao longo do Rio São Francisco.....	23
Tabela 2: Esquema de classificação recomendada pelo Simpósio do SEPM para formas de leito e acamamentos.	25

Sumário

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	12
1. Introdução.....	14
1.1. Apresentação e Área de estudo.....	14
1.2. Contexto Regional.....	14
1.3. Caracterização da área.....	16
1.3.1. Clima.....	16
1.3.2. Vento e ondas.....	19
1.3.3. Maré.....	20
1.3.4. Deriva Litorânea.....	21
1.4. Justificativa e Objetivos.....	21
2. Referencial Teórico.....	24
2.1. Formas de leito.....	24
2.2. Métodos Hidroacústicos.....	25
2.2.1. Sonografia.....	25
2.2.2. Perfilador acústico de correntes por Efeito Doppler (ADCP).....	27
3. Materiais e Métodos.....	29
3.1. Base de dados.....	29
3.2. Processamento dos dados Sonográficos.....	31
3.3. Processamento dos dados Hidrodinâmicos.....	32
3.4. Tratamento dos dados Sedimentológicos.....	33
3.5. Processamento dos dados Sísmicos.....	33
4. São Francisco River Strandplain: coastal line retreat related to bedforms, discharge and climate changes.....	35
ABSTRACT.....	35
INTRODUCTION.....	36
MATERIALS AND METHODS.....	38
RESULTS.....	40
DISCUSSIONS.....	48
CONCLUSIONS.....	49
ACKNOWLEDGEMENT.....	50
5. Considerações Finais.....	51

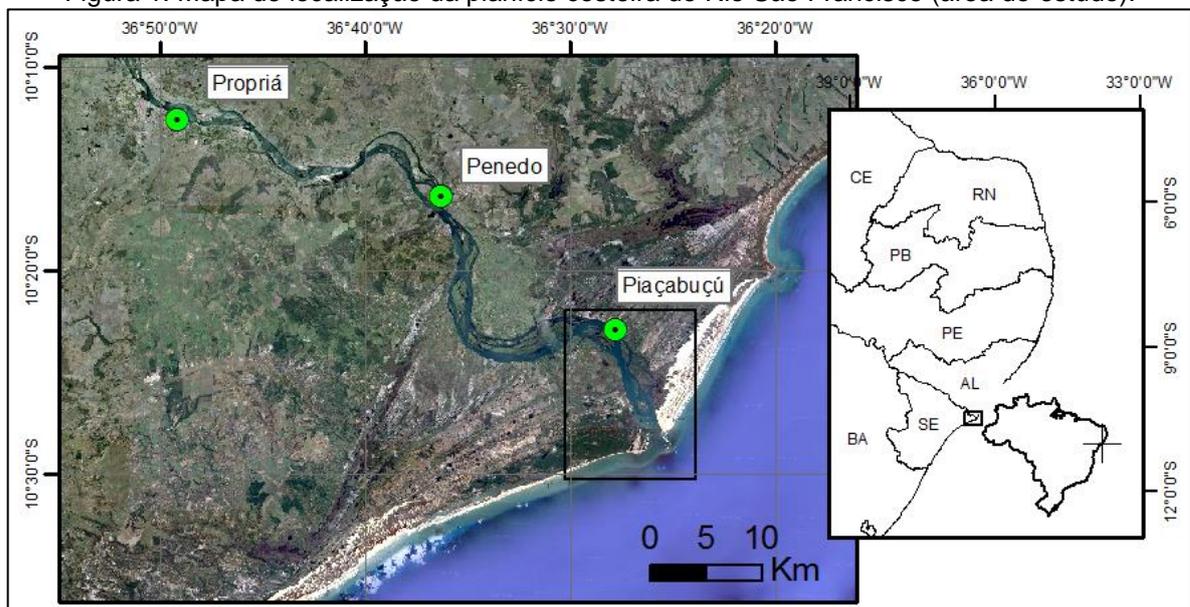
5.1. Conclusões e Recomendações	51
Referências Bibliográficas	53

1. Introdução

1.1. Apresentação e Área de estudo

A área de estudo está localizada na Planície Costeira do Rio São Francisco, mais especificamente em sua Foz, na divisa entre os estados de Sergipe e Alagoas (Figura 1). Os levantamentos de campo foram realizados entre a cidade de Piaçabuçu, Alagoas e o Oceano Atlântico.

Figura 1: Mapa de localização da planície costeira do Rio São Francisco (área de estudo).



Fonte: Elaborada pelo autor / Fonte da imagem de satélite: Google 2016 / Fonte da base cartográfica: IBGE. (Sistema de coordenadas: geográfica, Datum: WGS84).

O Rio São Francisco percorre cinco estados desde a sua nascente até a foz. Nasce na Serra das Canastras, em Minas Gerais, e passa pelos estados da Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe para, enfim, desaguar no Oceano Atlântico. São cerca de 2800km de percurso o que o torna o maior rio exclusivamente brasileiro.

1.2. Contexto Regional

O Rio São Francisco está apresenta uma planície costeira localizada na Bacia Sergipe-Alagoas e já foi caracterizada como um típico delta dominado por ondas. Posteriormente, Dominguez (1996) incorporou o papel da variação do nível do mar em sua evolução, mostrando que o delta do Rio São Francisco corresponde a um

modelo que difere dos modelos clássicos de deltas dominados por ondas (GALLOWAY, 1975; WRIGHT AND COLEMAN, 1973). Guimarães (2010) documentou a arquitetura deposicional deste delta, a partir de dados de testemunhos, e propôs um modelo evolutivo indicando que a transição de estuário para Delta se deu no Holoceno. Lima et al. (2014), associaram o desenvolvimento da planície costeira do Rio São Francisco ao seu rebaixamento devido a falhamentos, que promoveram o espaço de acomodação para a deposição dos sedimentos quaternários e poderiam estar associados tanto ao tectonismo quanto ao colapso gravitacional e a declividade da plataforma.

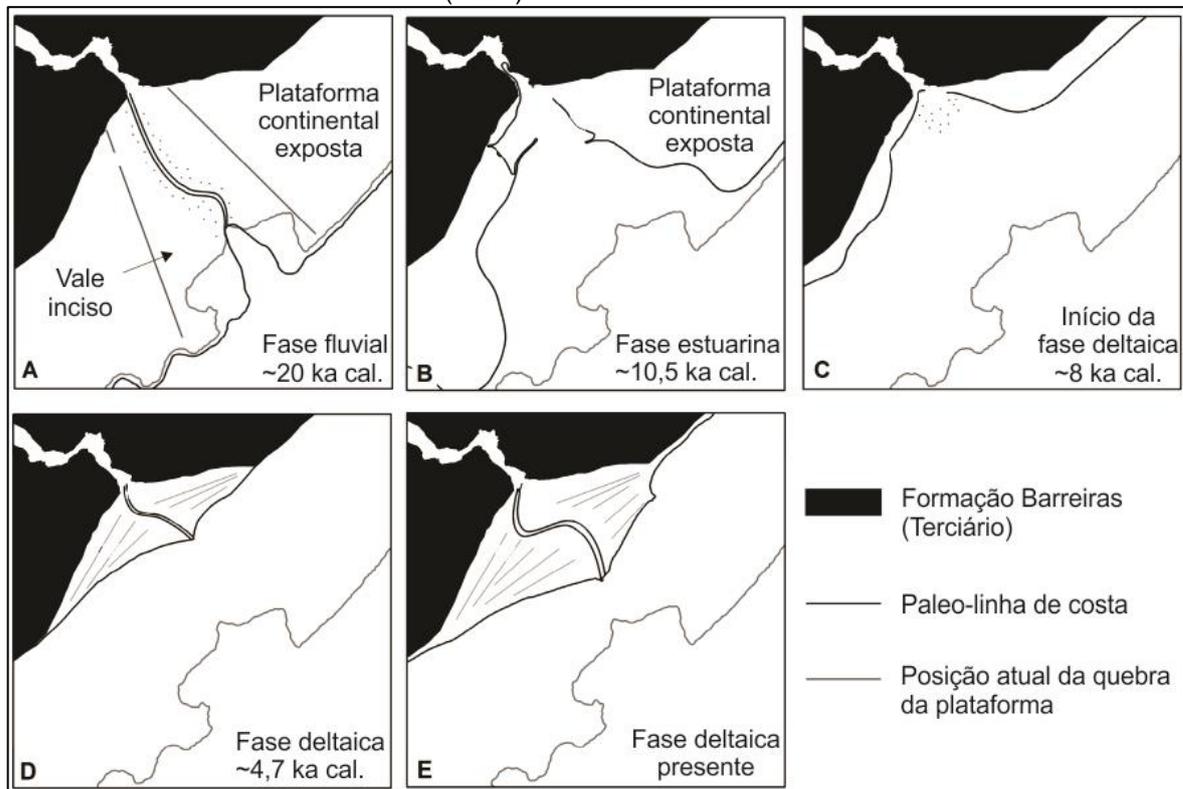
A Planície Costeira do Rio São Francisco é descrita na literatura como Quaternária e engloba sedimentos de idade Holocênica e Pleistocênica (BARBOSA e DOMINGUEZ, 2004). Ainda segundo estes autores, os depósitos Quaternários presentes nesta planície costeira incluem leques aluviais pleistocênicos, terraços de cordões litorâneos pleistocênicos e holocênicos, depósitos lagunares, depósitos fluviais, depósitos de mangues, depósitos fluviais, dunas e recifes. De acordo com os estudos desenvolvidos por Guimarães (2010) a arquitetura deposicional da planície Costeira do Rio São Francisco compreende três unidades deposicionais, que datam desde o Pleistoceno, sendo uma unidade fluvial, uma unidade estuarina e uma unidade deltaica (Figura 2): A unidade fluvial tem idade Pleistocena e foi depositada durante o Último Máximo Glacial (UMG), durante este período a plataforma continental estava completamente exposta e um vale foi escavado pelo rio. A unidade estuarina iniciou com a subida do nível do mar após o UMG, neste momento, o vale, anteriormente escavado pelo rio, foi inundado pelo mar. A unidade deltaica teve início por volta de 8 ka cal., quando teve início a progradação deltaica, provavelmente associada a diminuição nas taxas de subida do nível do mar.

As principais feições geomorfológicas presentes na área da foz do Rio São Francisco são os tabuleiros costeiros e a planície costeira. Os Tabuleiros Costeiros estão a um nível de aproximadamente quarenta metros acima da planície costeira e são sustentados principalmente pelos arenitos da Formação Barreiras (LIMA et al., 2014) que foram depositados em ambientes marinho e transicional, e, subordinadamente, sistemas fluviais entrelaçados (ROSSETTI et al., 2013, 2011).

A planície costeira do Rio São Francisco encontra-se adjacente a plataforma continental central do Brasil, conhecida por ser estreita e rasa, quando comparada com a largura média global das plataformas (DOMINGUEZ et al., 2013)

A geomorfologia da plataforma continental central do Brasil é resultado de um embasamento cratônico estável, exposto na maior parte do período Quaternário, com aporte sedimentar limitado e com ausência de substrato rochoso mais raso que 20m. A sedimentação é caracterizada por uma assembleia, não recifal, de grãos dominados por algas coralíneas encrustadas na zona oligófica da plataforma externa, e formações recifais limitadas bordejando a linha de costa (DOMINGUEZ et al., 2013). Depocentros de lama são controlados pelo espaço de acomodação criado por grandes vales incisos cortando a plataforma (DOMINGUEZ et al., 2013).

Figura 2: Esquema evolutivo da Planície Costeira do São Francisco, desde o Último Máximo Glacial (UMG) até os dias atuais.



Fonte: Modificado de Guimarães (2010)

1.3. Caracterização da área

1.3.1. Clima

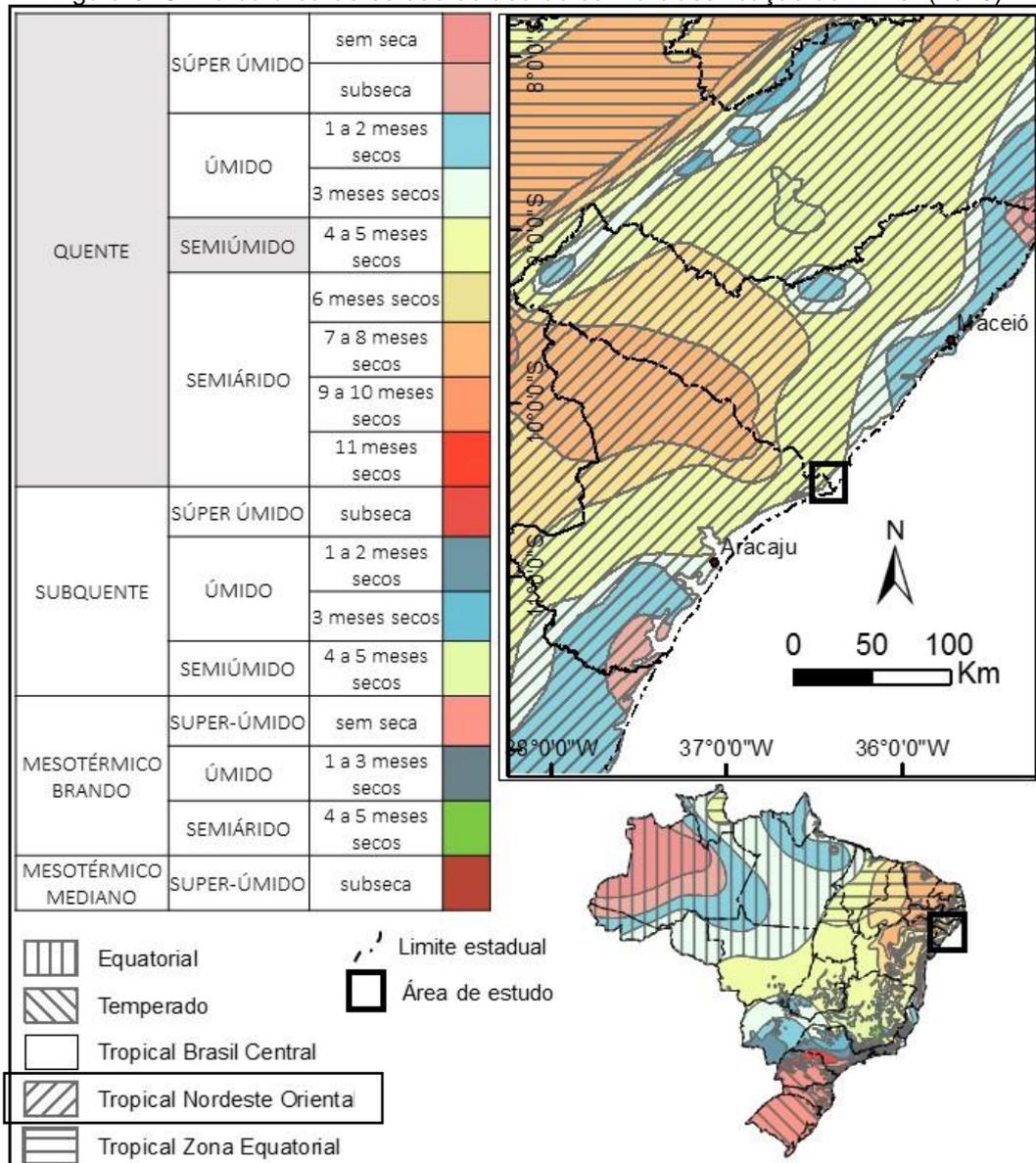
A área de estudo está inserida na zona Tropical Nordeste Oriental com clima quente e semiúmido segundo Nimer (1979) (Figura 3), que corresponde ao clima As (Zona Tropical com verão seco) de Köppen (1936) (Figura 4).

A pluviosidade nesta região é significativa com curtos períodos secos. As chuvas mais intensas ocorrem no outono e no inverno, já os períodos mais secos ocorrem na primavera e no verão (

Figura 5). A diferença entre as médias das precipitações do mês mais seco e do mês mais chuvoso é de 213,1 mm, já a precipitação média anual é de 1376.9 mm.

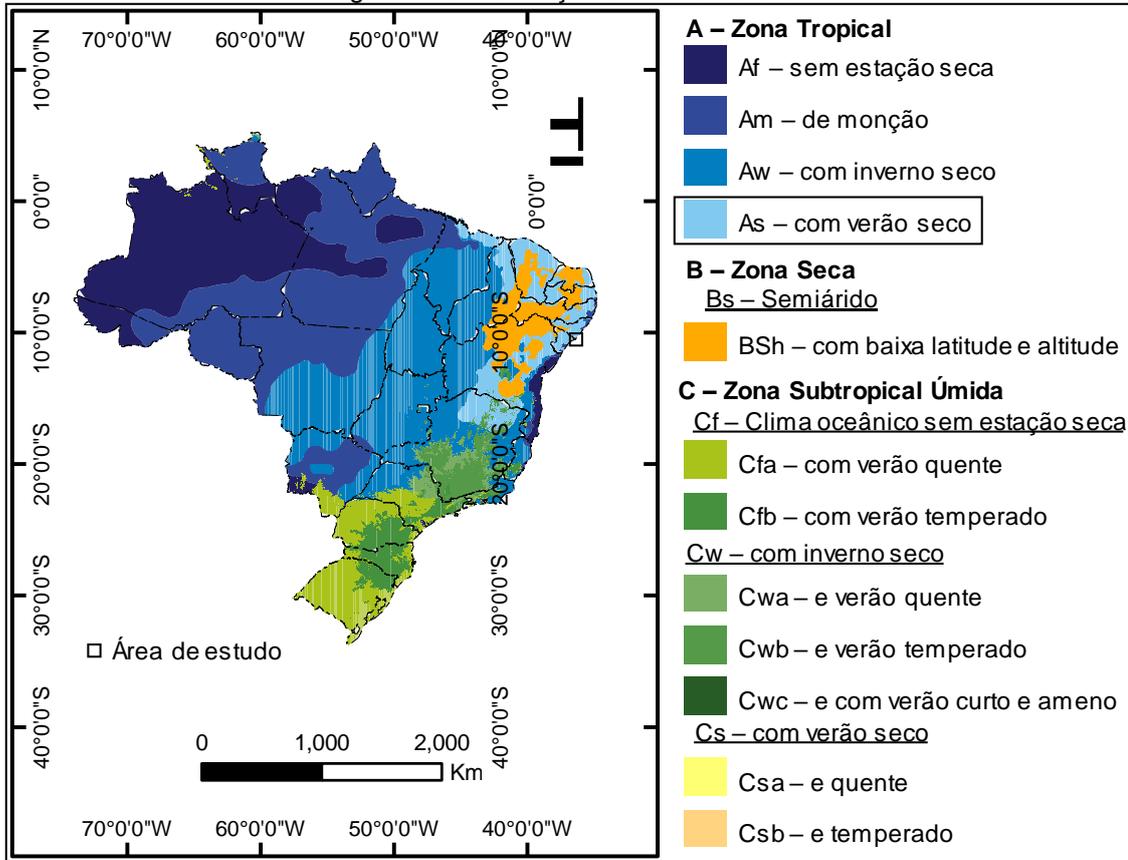
Caracterizada por baixa amplitude térmica, apresenta as temperaturas máximas no verão, que podem passar dos 30 °C, e as mínimas no inverno, que podem chegar a pouco menos de 20° C (Figura 6). Entretanto, as temperaturas médias mensais variam de entre 23,9 °C à 27,3 °C. A temperatura média anual é de 25,8 °C (Figura 7).

Figura 3: Clima da área de estudo de acordo com a classificação de Nimer (1979)



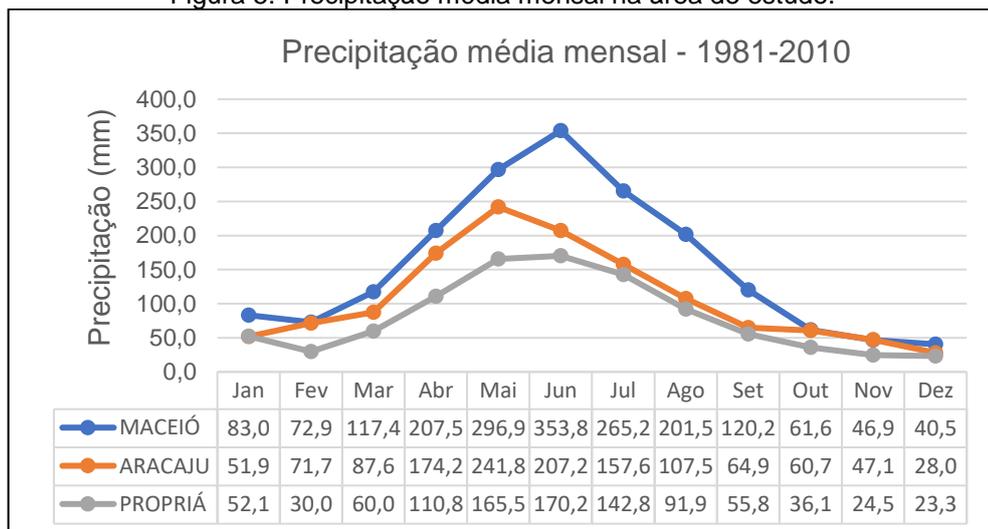
Fonte: Elaborada pelo autor / Fonte da base de dados: IBGE

Figura 4: Classificação climática do Brasil



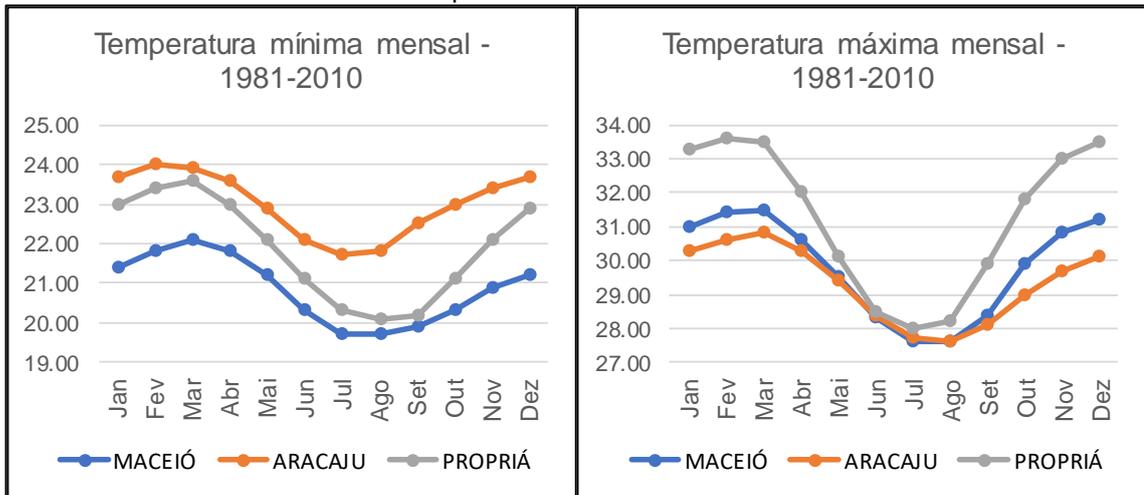
Fonte: Alvares et al. (2013) (de acordo com os critérios de (Köppen, 1936))

Figura 5: Precipitação média mensal na área de estudo.



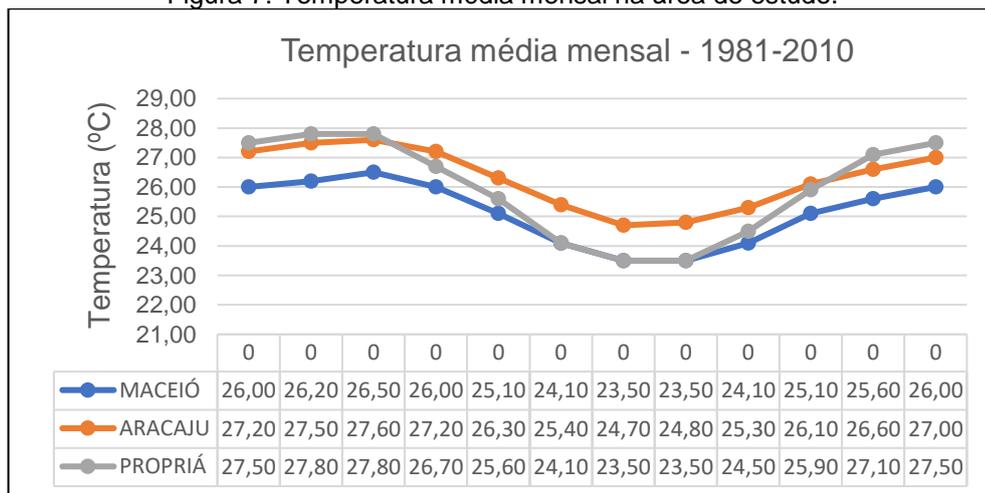
Fonte: Elaborada pelo autor / Fonte da base de dados: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

Figura 6: Variações de temperatura na área de estudo. Em A: Temperatura mensal mínima. Em B: Temperatura mensal máxima.



Fonte: Elaborada pelo autor / Fonte da base de dados: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

Figura 7: Temperatura média mensal na área de estudo.



Fonte: Elaborada pelo autor / Fonte da base de dados: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

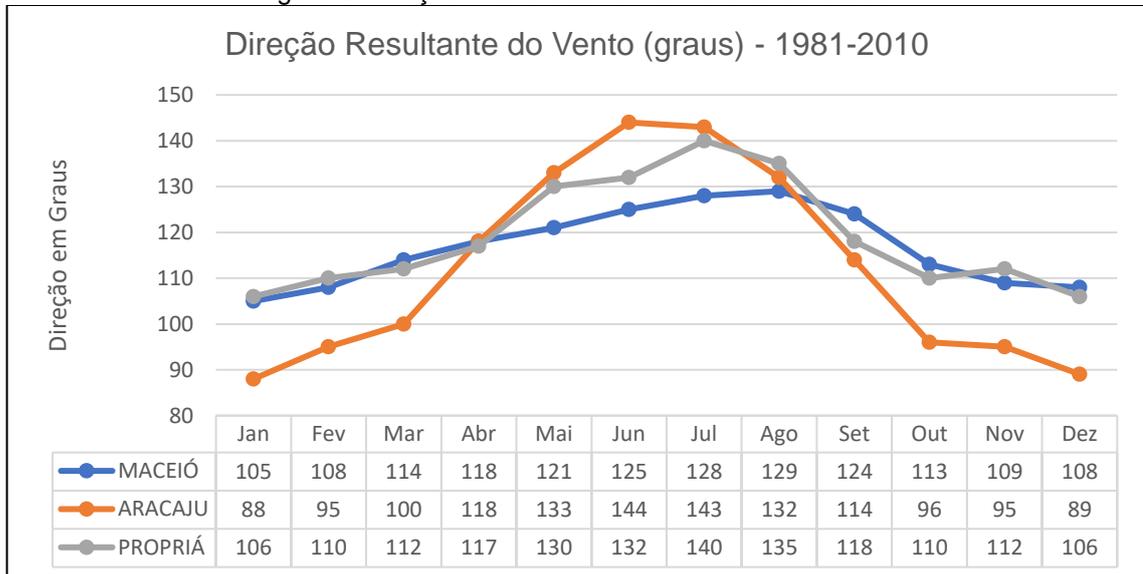
1.3.2. Vento e ondas

A variação média mensal dos ventos na área de estudo é de aproximadamente 37° em relação a direção e de aproximadamente 1,4 m/s em relação a intensidade. Os ventos sopram de 137° Az nos meses de julho variando até 100° Az nos meses de janeiro (Figura 8). Já a intensidade varia de 3,7 m/s no mês de novembro até 2,3 m/s nos meses de maio, junho e julho (Figura 9). Dessa forma, pode-se dizer que os ventos na área estudada sopram da direção ESE com intensidades médias de 3 m/s.

Segundo Pianca et al. (2010), as ondas predominantes são de leste-sudeste, com alturas de 1m a 2m e períodos de 6s e 8s, geradas pelos ventos alísios durante

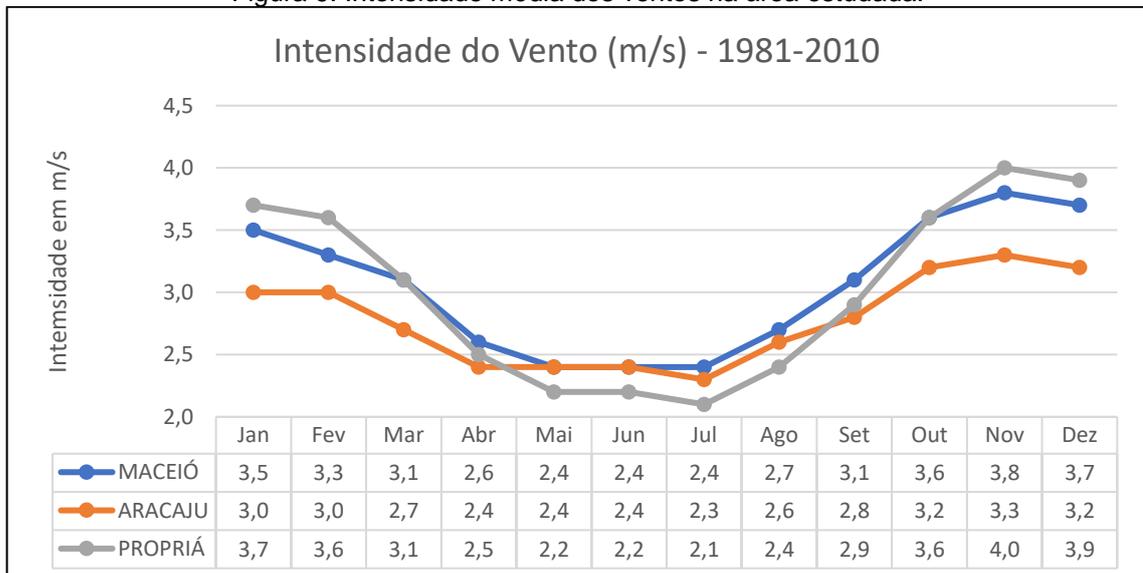
o outono e o inverno. Ondas de sul-sudeste são associadas por estes autores com frentes frias de altas latitudes.

Figura 8: Direção média dos ventos na área estudada.



Fonte: Elaborada pelo autor / Fonte da base de dados: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

Figura 9: Intensidade média dos ventos na área estudada.



Fonte: Elaborada pelo autor / Fonte da base de dados: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

1.3.3. Maré

A área de estudo está localizada entre os portos de Maceió e Sergipe, dessa forma, foi considerado os dados de maré presentes nas cartas náuticas disponíveis para download no site da Marinha do Brasil.

A área de estudo está inserida em uma região de micromaré. Os valores médios da altura da maré alta são de 2,1 m em marés de sizígia e de 1,6 m em marés de

quadratura, já os valores médios na maré baixa são de 0,2 m em marés de sizígia e de 0,7 m em marés de quadratura. Dessa forma, as amplitudes médias de maré são de 1,9 m na maré de sizígia e de 0,9 m na maré de quadratura. Estes dados foram retirados das cartas náuticas da Marinha do Brasil.

1.3.4. Deriva Litorânea

As correntes de deriva litorânea são correntes influenciadas por ondas que se aproximam obliquamente ao litoral. Estas correntes movimentam grande quantidade de sedimentos que são transportados ao longo do litoral. A deriva litorânea, estimada para a região do delta do São Francisco é Nordeste-Sudoeste (GUIMARÃES, 2010).

1.4. Justificativa e Objetivos

A área estuda se situa no Delta do Rio São Francisco, entre os estados de Sergipe e Alagoas. O Rio São Francisco é maior rio do Nordeste e o maior rio inserido totalmente em território brasileiro. Este rio tem grande importância para irrigação, pesca, geração de energia, abastecimento de água para diversas cidades e navegação envolvendo o transporte de pessoas e mercadorias. Além disso, o turismo foi fortemente desenvolvido em seu litoral, tornando essa atividade como uma das principais fontes de renda para as cidades litorâneas adjacentes. Dessa forma, podemos dizer que este rio tem grande importância econômica e social.

O litoral do Rio São Francisco tem sofrido intensa erosão costeira nas últimas décadas, fruto de um severo retrabalhamento da linha de costa. Esse retrabalhamento foi o responsável pela extinção da Vila do Cabeço que hoje se encontra submersa (Figura 10). Diferentes estudos (BITTENCOURT et al., 2007; DOMINGUEZ et al., 2003; OLIVEIRA et al., 2003; TRAINI et al., 2012; VITAL et al., 2001) têm atribuído tal retrabalhamento costeiro à construção de diversas barragens que antecederam essas mudanças na linha de costa. Vale salientar que as linhas de costa tendem a se ajustar ao regime hidrodinâmico e de aporte sedimentar local, portanto, é importante entender em que contexto da evolução costeira recente está a linha de costa do delta do São Francisco.

Figura 10: Extinção da vila do cabeço devido ao retrabalhamento costeiro. O farol presente nas três fotos pode ser tomado como referência. A: ano de 1994. B: ano de 1998. C: ano de 2010



Fonte: (GEOLOGIA MARINHA E COSTEIRA, 2010)

Foram construídas 9 barragens ao longo do Rio São Francisco, sendo, 7 dessas, no baixo curso do rio. Na Tabela 1 é possível visualizar as barragens construídas bem como as informações referente ao início do funcionamento, a potência instalada, bem como o volume útil do reservatório.

Tendo em vista o contexto de aporte sedimentar fluvial, bem como da hidrodinâmica fluvial e costeira, buscou-se compreender qual a fonte predominante dos sedimentos depositados na porção proximal do delta. Para isso, estudos foram utilizados na caracterização da área, de forma a compreender a hidrodinâmica e morfodinâmica da região no período entre 2009 e 2012.

Apesar das informações acima citadas, a área em estudo carece de informações detalhadas de morfodinâmica e hidrodinâmica. Neste sentido o principal objetivo dessa pesquisa é a caracterização dinâmica da área da Foz do Rio São Francisco considerando fatores como a morfologia de fundo, tipo de sedimento, dados de corrente, vazão e dados pluviométricos.

Tabela 1: Barragens construídas ao longo do Rio São Francisco

Hidroelétricas	Ano de Funcionamento	Potência instalada (MW)	Volume útil do reservatório (hm³)	Localização na Bacia
Três Marias	1952	396	15278	Alto curso
Sobradinho	1979	1050	28669	Sub-médio
Paulo Afonso 1, 2 e 3	1954, 1965 e 1971	1420	9,8	Baixo curso
Paulo Afonso 4	1979	2462	29,5	Baixo curso
Apolônio Sales (Moxotó)	1977	400	180	Baixo curso
Luiz Gonzaga (Itaparica)	1988	1500	3549	Baixo curso
Xingó	1994	3162	41	Baixo curso

2. Referencial Teórico

2.1. Formas de leito

Formas de leito são feições geomorfológicas formadas pela interação entre um fluxo e um sedimento inconsolidado (NICHOLS, 2009). As formas de leito podem ser formadas na superfície do continente, pela interação do vento com os sedimentos formando dunas eólicas, bem como pela interação de um fluxo subaquoso com os sedimentos no leito submerso, formando dunas subaquosas.

Diversas são as aplicações do estudo das formas de leito subaquosas. A sua caracterização em relação à altura, forma, espaçamento e disposição pode dizer muito a respeito da dinâmica local. Dessa maneira, o seu estudo pode auxiliar em diversas obras de engenharia tais como, aterros, construção e manutenção de hidrovias, construção de pontes, planejamento de implantação de dutos e cabos, tuneis submarinos dentre outros.

As formas de leito descritas neste estudo seguem a classificação adotada por Ashley (1990), segundo a qual as formas de leito subaquosas se formam em ambientes onde a profundidade é superior a 1 m, a granulometria dos sedimentos é maior que 0,15 mm (areia muito fina) e as velocidades de fluxo são superiores a 0,4 m/s.

Ashley (1990) recomenda que as formas de leito subaquosa sejam classificadas de acordo com os dados de primeira, segunda e terceira ordem, seguindo essa sequência de importância (Tabela 2). Os dados de primeira ordem são considerados necessários e classificam as dunas de acordo com o tamanho e forma. Os dados de segunda ordem são considerados importantes e devem ser usados se viáveis, esses dados correspondem ao tamanho do grão e a ocorrência de sobreposições de formas de leito. Os dados de terceira ordem são considerados úteis e levam em consideração detalhes e comportamentos das formas de leito e do fluxo. Dunas pequenas têm comprimento, ou espaçamento, que vão de 0,6 m à 5 m, dunas médias vão de 5 à 10 m, dunas grandes vão de 10 à 100 m e as dunas grandes são maiores que 100 m, a denominação de *ripples* (marcas onduladas) correspondem as formas de leito com tamanho inferior a 0,6 m. Já em relação a forma, as formas de fundo podem ser classificadas como 2D (crista reta) ou 3D (crista sinuosa).

Tabela 2: Esquema de classificação recomendada pelo Simpósio do SEPM para formas de leito e acamamentos.

DUNAS SUBAQUOSAS				
Dados de Primeira Ordem (necessários)				
Tamanho	Pequenas	Médias	Grandes	Muito Grandes
Comprimento ⇒	0.6-5 m	5-10 m	10-100 m	>100 m
Altura * ⇒	0.075-0.4 m	0.4-0.75 m	0.75-5 m	>5 m
Forma ⇒ 2-D (Bi-dimensionais) 3-D (Tri-dimensionais)				
Dados de Segunda Ordem (importantes)				
- Sobreposição ⇒ simples ou composta (tamanho e orientação relativa) - Características de sedimento (tamanho, tipo)				
Dados de Terceira Ordem (úteis)				
- Perfis da forma de leito (comprimentos e ângulos de inclinação do <i>stoss</i> e <i>lee</i>) - Deposição da camada (fração da camada coberta pelas formas de leito) - Estrutura do fluxo (características de tempo-velocidade) - Intensidade relativa dos fluxos opostos - História do comportamento de migração das dunas (acrecção vertical e horizontal)				
* Altura calculada usando-se a equação $H = 0.0677L^{0.8098}$ (Flemming 1988).				

Fonte: (ASHLEY, 1990).

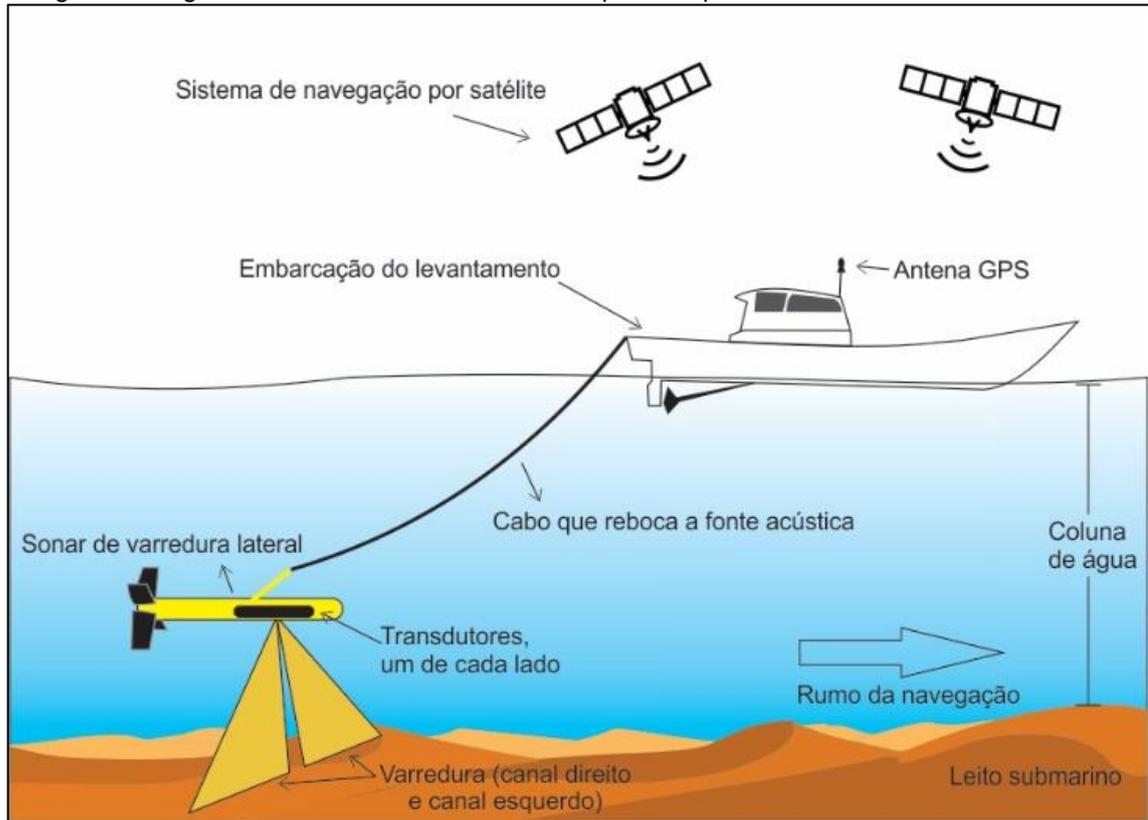
2.2. Métodos Hidroacústicos

2.2.1. Sonografia

O sonar de varredura lateral é um equipamento geofísico que permite o imageamento do leito submarino, sendo assim, consiste em uma ferramenta utilizada para visualizar objetos sobre ou acima do leito submerso (BJØRNØ, 2017). O funcionamento deste equipamento se baseia nos princípios de propagação do som na água. A emissão dos sinais acústicos é feita por dois transdutores em tempos regulares, esses mesmos transdutores também são responsáveis pela recepção do sinal que se dá pela reflexão ou do *backscattering* no leito submerso (SOUZA, 2006).

O equipamento sonar de varredura lateral consiste basicamente em três unidades, a unidade submersa, que carrega os transdutores, muitas vezes chamada de “peixe”, a caixa processadora que se comunica com o peixe e o cabo que serve tanto para rebocar o peixe como para fazer a comunicação entre o peixe e a caixa processadora (Figura 11).

Figura 11: Figura mostrando como o dado é adquirido a partir do sonar de varredura lateral.

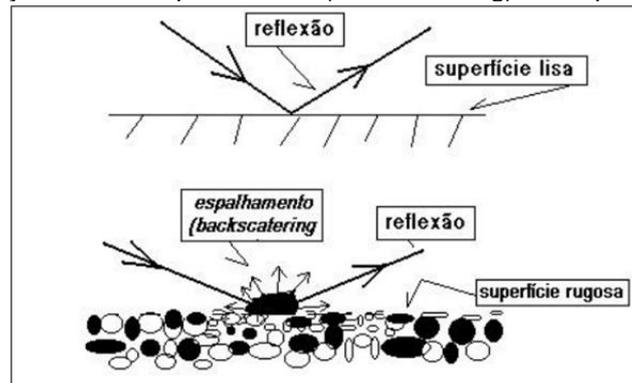


Fonte: Elaborada pelo autor

O sinal acústico emitido pelos transdutores do sonar é de alta frequência, impossibilitando a penetração ao longo dos extratos sedimentares. Dessa forma, o sinal refletido possibilita a obtenção detalhada das feições presentes do leito submerso. (SOUZA, 2006).

O retorno do sinal acústico se dá graças as irregularidades presentes no fundo, caso o leito seja totalmente plano, o sinal refletido não retornaria conforme a Figura 12. Dessa forma, pode-se concluir que em fundos homogêneos, a quantidade de energia que retorna é menor, já em fundos mais irregulares, a energia que retorna é maior. Tal fato acontece porque em fundos irregulares, há a maior probabilidade de se ter superfícies de fundo com fácies voltadas para o transdutor (Souza, 2006).

Figura 12: Comparação entre o espalhamento (backscattering) em superfícies lisas e rugosas.



Fonte: Modificado de (MAZEL, 1985) retirado de Souza (2006).

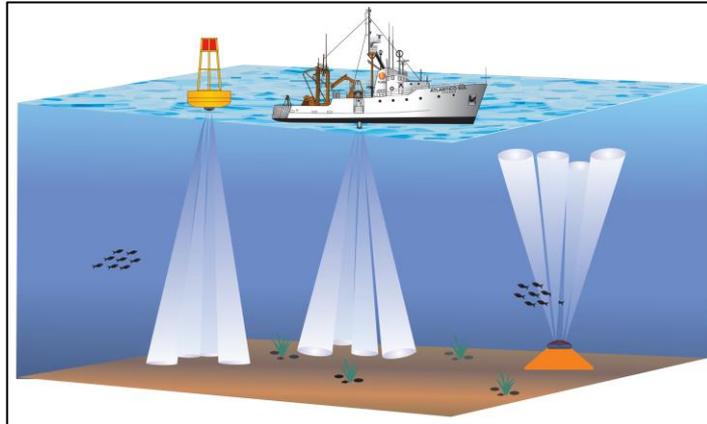
A afirmação acima nos leva a fazer algumas previsões em relação as diferenças texturas que se pode esperar em determinados locais. Como é o caso de fundo arenosos em contato com fundo lamoso, o primeiro apresentará uma maior energia de retorno do sinal. Já e em fundos irregulares em contato com fundo plano, o último apresentará menor energia de retorno do sinal. Locais com presença de estruturas sedimentares ou afloramentos rochosos são exemplos de fundos irregulares.

2.2.2. Perfilador acústico de correntes por Efeito Doppler (ADCP)

O ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) é um perfilador acústico e consiste em um método confiável na medição da velocidade e direção dos cursos d'água ao longo de um intervalo de profundidade (Figura 13).

As medições de velocidades feitas pelo ADCP são baseadas no princípio do efeito Doppler. O efeito Doppler foi descoberto em 1942, na cidade de Praga, pelo físico austríaco Christian Doppler. O efeito consiste na mudança da frequência de uma onda para um observador que se move de forma relativa em relação a fonte dessa onda (PETRESCU, 2012). Dessa forma, o ADCP transmite pulsos acústicos a uma frequência fixa e conhecida, então, o ADCP escuta e processa os ecos refletidos a partir do material particulado presente na água (PETRESCU, 2012). A diferença de frequência entre o som emitido e refletido é proporcional a velocidade relativa entre o ADCP e os materiais particulados na água. Este método supõe que o material particulado se desloca na mesma velocidade do fluxo da água (MÖLLER JR e ABE, 2011).

Figura 13: ADCP em diferentes formas de medição, da esquerda para a direita, numa boia, no navio e no fundo



Fonte: (Möller Jr and Abe, 2011).

O registro de ADCP pode gerar um perfil do leito submerso quando adquirido fixo ao casco da embarcação em movimento. Nesse caso, é possível identificar grandes formas de fundo a partir de um perfil de ADCP.

3. Materiais e Métodos

3.1. Base de dados

A base de dados utilizada neste estudo foi proveniente de dois levantamentos realizados na foz do Rio São Francisco, na cidade de Piaçabuçú - AL. O primeiro levantamento ocorreu em janeiro de 2009 e o segundo ocorreu em setembro de 2012 utilizando embarcações pesqueiras alugadas próximo ao local (Figura 14).

Figura 14: Embarcação utilizada na aquisição dos dados

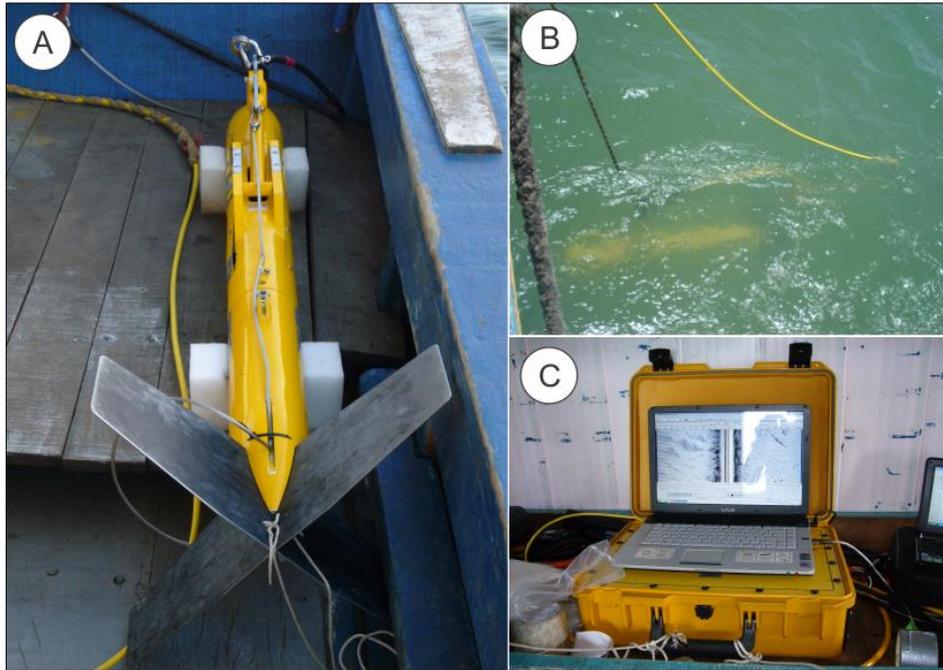


Fonte: Kerstin Schrottke

Dados sonográficos foram adquiridos a partir de um sonar de varredura lateral modelo 272-TD da marca Edgetech (Figura 15), dados hidrodinâmicos foram adquiridos utilizando um perfilador acústico de efeito Doppler ADCP (modelo RDI Rio Grande) (

Figura 16), dados sedimentológicos foram adquiridos, na campanha de 2009, utilizando uma draga pontual do tipo Van Veen (Figura 17). Ainda foram utilizados dados de um perfilador de subfundo com sistema paramétrico, modelo SES 2000 da Innomar Technologie (Figura 18).

Figura 15: Sonar de varredura lateral utilizado para a coleta de dados. A) e B) veículo rebocável (*town fish*) respectivamente na embarcação e na água, C) Aquisição do dado em tempo real.



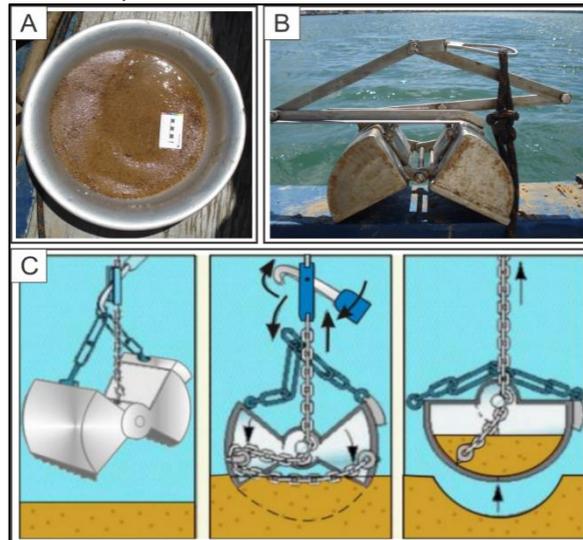
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 16: ADCP modelo Rio Grande da RDI utilizado neste estudo. A) sensor na água; B) sensor a bordo.



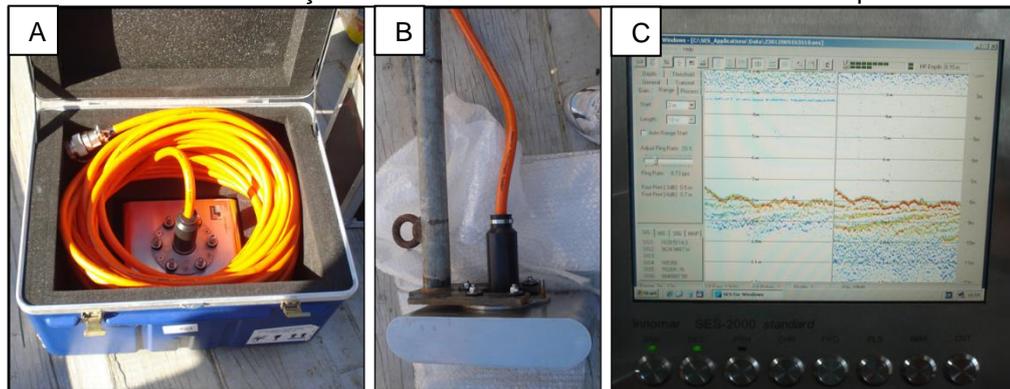
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 17: Amostragem sedimentológica. A) Sedimento coletado; B) Draga Van-Veen; C) Desenho esquemático da coleta de sedimento



Fonte: (FRAZÃO, 2003)

Figura 18: Perfilador de subfundo modelo SES 2000 da Innomar Technologie. Em A: o equipamento dentro da caixa de transporte, em B: o equipamento montado em uma estrutura de metal, pronto para ser fixado na lateral da embarcação e em C: Tela mostrando o dado sendo adquirido em tempo real



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2. Processamento dos dados Sonográficos

Os dados sonográficos foram adquiridos a partir do software Discover, posteriormente, os dados foram processados pelo software Sonarwiz da Chesapeake, versão 5.

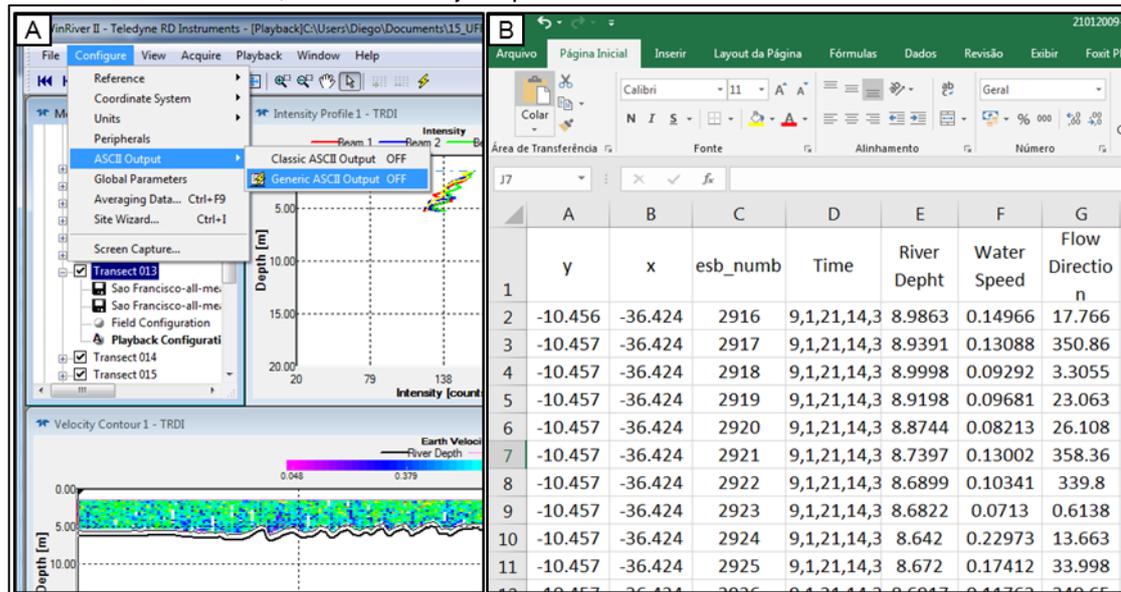
O processamento dos dados no SonarWiz consistiu na junção das linhas e ajustes para melhor visualização. Os ajustes consistiram em aumento do contraste e do ganho variável de tempo (TVG), permitindo uma visualização mais uniforme dos dados.

Com os dados processados foi possível a identificação e caracterização de diferentes padrões de formas de fundo bem como a comparação entre os padrões presentes nos dois períodos de levantamento, 2009 e 2012.

3.3. Processamento dos dados Hidrodinâmicos

Os dados Hidrodinâmicos foram adquiridos a partir do software WinRiver da Teledyne. Posteriormente, os dados foram exportados para o Excel com informações de velocidade, profundidade e direção das correntes. Por fim, os dados foram processados no Excel para criação de gráficos e para serem visualizados em mapas do ArcGis.

Figura 19: Dados hidrodinâmicos do ADCP. Em A: os dados sendo exportados como ASCII a partir do software WinRiver II, em B: Dados já exportados e formatados sendo visualizados no Excel.



Dados históricos de vazão e pluviométricos foram adquiridos com o objetivo de fazer correlações com as formas de fundo. Os dados pluviométricos foram adquiridos pelo INMET - Instituto Nacional de Meteorologia da estação 83097 de Propriá - SE, já os dados de vazão foram adquiridos a partir da estação 49705000 de Propriá - SE. A cidade de Propriá fica a 50 km da área de estudo.

Os dados de vazão são mais relevantes do que os dados pluviométricos para este estudo. Tal afirmação se deve ao fato de que a vazão do rio é controlada pelas barragens, então, mesmo que o regime de chuvas aumente, a vazão pode ser controlada pelas barragens que antecedem a estação de Propriá. Dessa forma,

podemos afirmar que a influência antrópica, ao regular a vazão do rio, exerce grande importância na dinâmica da foz do Rio São Francisco.

3.4. Tratamento dos dados Sedimentológicos

Os dados Sedimentológicos foram coletados com um amostrador pontual do tipo Van Veen (Figura 17) e após análises em laboratório foram classificados quanto a granulometria em um granulômetro a laser modelo 1180L, da marca CILAS. O software utilizado para classificação das amostras foi o Sistema de Análise Granulométrica (SAG), software desenvolvido pelo Laboratório de Geologia Marinha, LAGEMAR - da Universidade Federal Fluminense, UFF.

3.5. Processamento dos dados Sísmicos

Os dados sísmicos foram convertidos do formato SES para SGY pelo software SESConvert, fornecido pelo fabricante do equipamento. Após convertidos, os dados foram importados para o software Reflexw da Sandmeier e visualizados considerando a velocidade da água em 1500 m/s.

Foram feitas comparações entre as formas de leito presentes nos anos de 2009 e 2012. O objetivo dessa comparação foi quantificar variações no espaçamento e na altura das dunas. Foram inseridos pontos nas cristas e nas calhas das dunas, esses pontos foram exportados como ASCII com informações de profundidade e localização, dessa maneira, foi possível manipular esses dados em Excel para calcular as alturas e espaçamento das dunas (Figura 20).

Algumas seções sísmicas foram vetorizadas no ArcGis para calcular a variação no volume de sedimentos entre os anos de 2009 e 2012. Primeiro foram definidas as áreas para comparação, em seguida as seções foram cortadas no mesmo tamanho e vetorizadas, finalmente, o volume de sedimentos foi calculado. A base dos sedimentos foi definida a partir de um refletor que representava a superfície de migração das dunas (Figura 21).

Tentou-se fazer as comparações entre dados que tinham o posicionamento mais semelhante possível, já que, em espaços de poucos metros, as características das formas de fundo variavam significativamente em termos de tamanho e forma.

Figura 20: Processamento dos dados no Reflexw e Excel. Em A: Inserção de pontos nas cristas e calhas das dunas. Em B: Dados de A exportados para o Excel para calcular altura e espaçamento das dunas.

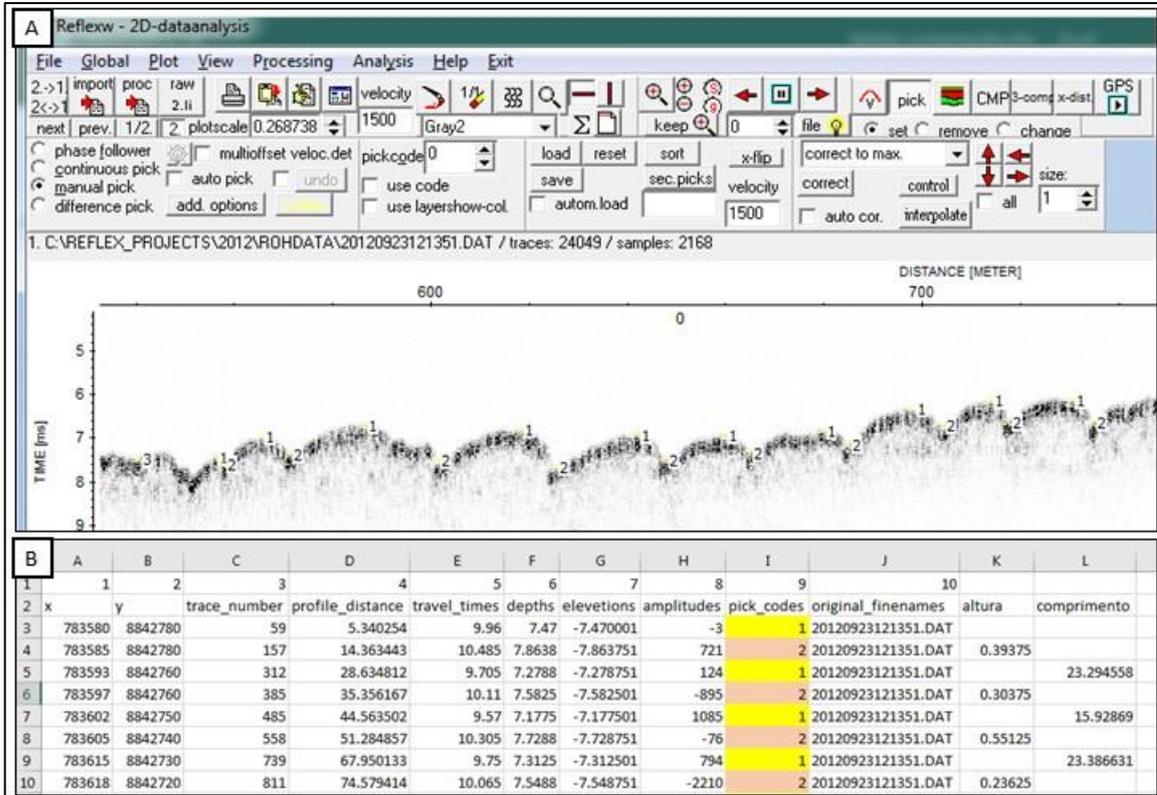
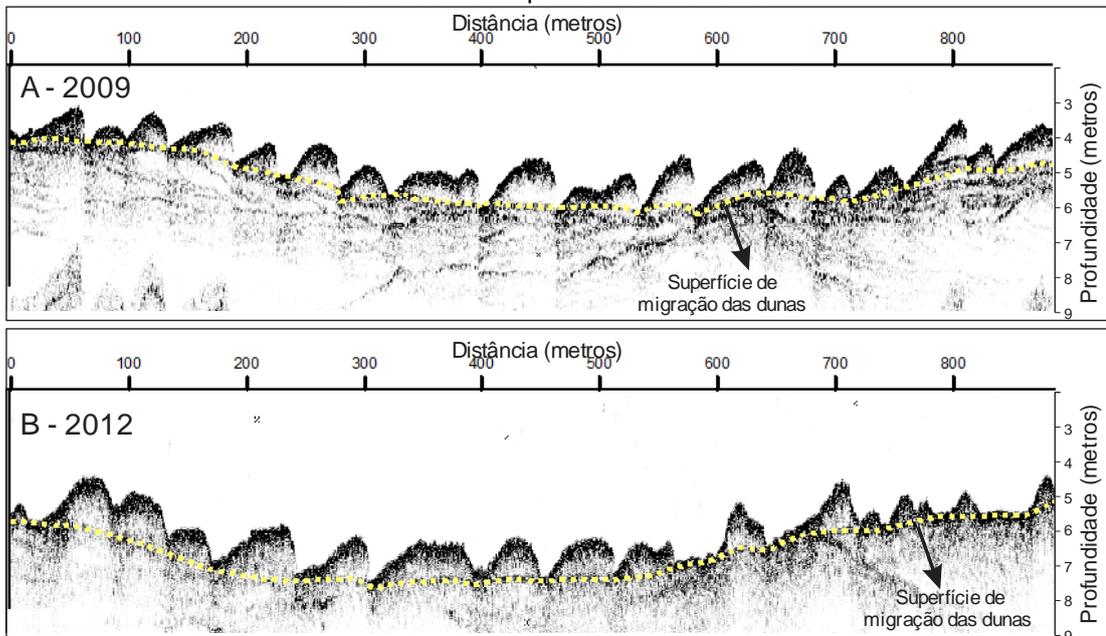


Figura 21: Perfis sísmicos com superfície de migração marcada em amarelo. O volume de sedimento acima dessa superfície foi calculado.



4. São Francisco River Strandplain: coastal line retreat related to bedforms, discharge and climate changes

Diego D' Avila Beserra¹, Helenice Vital², André Giskard Aquino da Silva³ and Karl Stattegger⁴

^{1,2,3} **Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN,
Natal, Brazil**

¹ diegobeserra@gmail.com (corresponding author)

² helenicevital2004@yahoo.com.br

³ andregiskard@hotmail.com

⁴ **Geosciences Institut
Kiel University – CAU
KIEL, Germany**

karl.stattegger@ifg.uni-kiel.de

ABSTRACT

The São Francisco River is located in northwestern Brazil and is the longest river that runs entirely within the country of Brazil. This river has been greatly affected by coastline retreat, with a history of severe coastline erosion. These changes in the coastline have been attributed to anthropogenic changes such as the construction of dams. The purpose of this study is to understand what factors control short-term changes in the coastline of this river. Three separate satellite images were used, and the coastlines were drawn for the time periods of each cruise: 2009, 2012 and 2017. The lines were drawn using Landsat 7 ETM+ scenes for 2009 and 2012 and with Landsat 8 OLI scenes for 2017. Accretion and erosion were calculated, as well as the accretion/erosion ratio for areas northeast and southwest of the São Francisco River Mouth. Sonographic and seismic data were acquired from 2009 and 2012 to identify the changes in bedforms during those periods. The sonographic data were acquired using a Side Scan Sonar model 272-TD from Edgetech, and seismic data were acquired using a parametric sub-bottom profiler model SES 2000 from Innomar

Technologie. Hydrodynamic data were acquired in 2009 using an Acoustic doppler current profiler (ADCP) to understand the behavior of the river mouth. Sediment samples from 2009 were collected with a Van Veen Grab to analyze sediment distribution in the area. Additionally, historical data regarding rainfall, river runoff, Oceanic Nino Index (ONI) events and South Atlantic Convergence Zone (SACZ) events were obtained to find any correlations with coastal changes. The analyzed and processed data showed that the bedforms had not undergone any significant changes, indicating that the river was still transporting enough sediments to the coast. The SACZ events had a greater influence on the rainfall regime than ONI events. However, the anthropogenic interference of rivers dams also had a greater influence on coastline changes than rainfall regimes. We therefore conclude that the São Francisco River is the main provider of sediment to the coast; in this way, this river will always find a new equilibrium when its discharge is controlled.

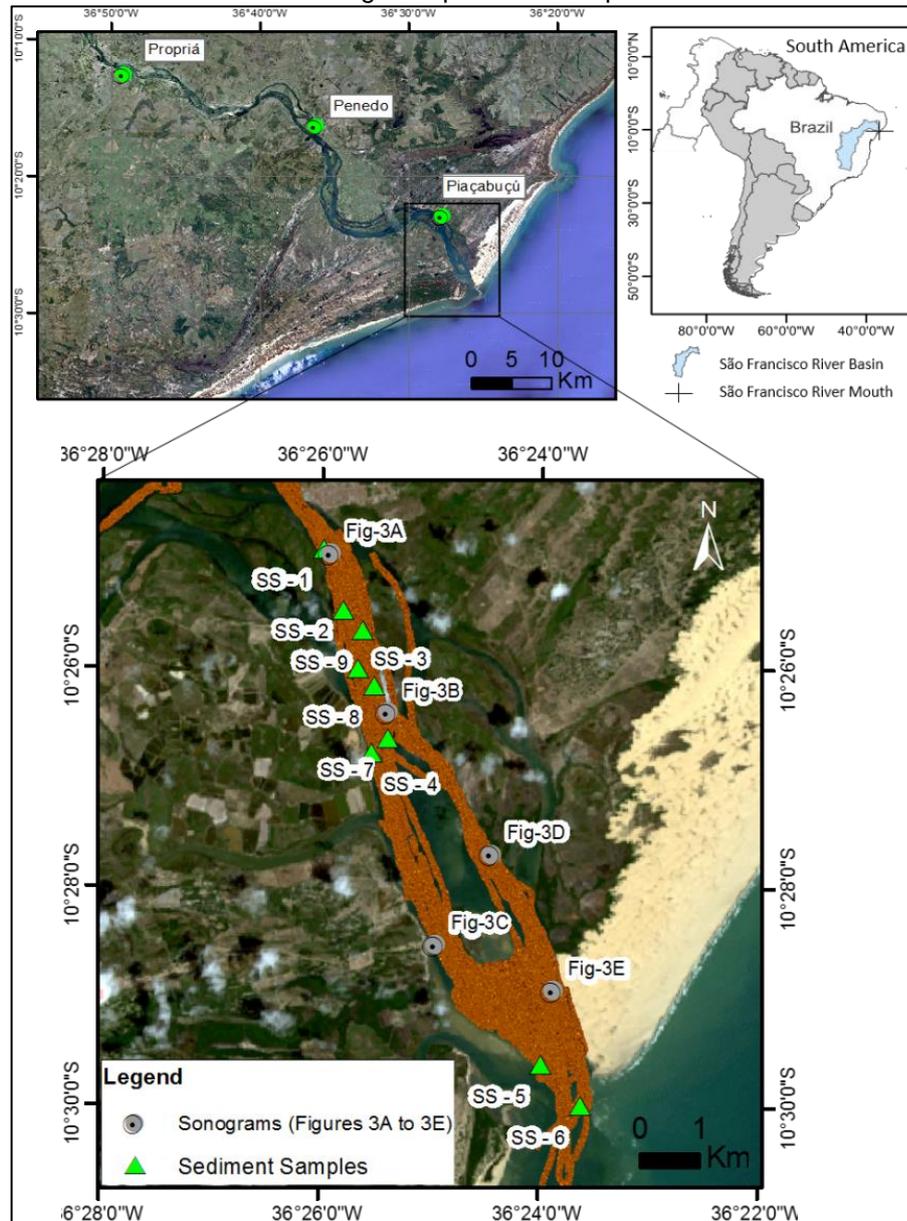
Key Word: Costal Dynamics; Bedforms; Side scan sonar; Delta.

INTRODUCTION

Rivers are the major sediment suppliers to the continental shelf and shoreline (Bhattacharya, 2006). Therefore, any changes in river discharge and sediment load may cause changes on adjacent shoreline morphodynamic and such changes can be seen at the coast as erosion and accretion. A total of 48% of all rivers in the world are moderately to severely impacted by flow regulation, fragmentation, or both; moreover, this number can be as high as 93% if all ongoing and planned constructions of dams are completed (Grill et al., 2015). Coastal changes have a great influence on the lives of humans. Approximately 37% of the world's population lives within 100 km of the coast, and approximately 44% live within 150 km of the coast (Syvitski et al., 2005).

In order to deepen the knowledge in how rivers influence coastal changes, this study was developed at the mouth of the São Francisco River, an important river of NE Brazil. The São Francisco River (Figure 1) is the longest river located completely within Brazilian territory. The River is of great importance for a number of economic activities such as irrigation, fishery, power generation, water supply, tourism and transportation of people and goods.

Figure 1: Location map zoomed-in at the imaged area by the side scan sonar represented by the sonograms plotted on map.



At the mouth of the São Francisco River was formed a wave-dominated delta, which is considered a classic example of such delta type (Galloway, 1975; Wright and Coleman, 1973). Nevertheless, Dominguez (1996) demonstrated that sea level variations have had a great influence on its evolution, showing that this delta model differs from other classic wave-dominated deltas.

Guimarães (2010) also built an evolutive model for this delta using well data, which considered the development of three units: the fluvial, estuarine and deltaic. The fluvial unit occurred first and was deposited in the Pleistocene, during the last glacial maximum (LGM). Within the development of the fluvial unit it was excavated a valley

on the exposed continental shelf, prior the estuarine unit. The estuarine unit began with the sea level rise after the LGM by the flooding of the excavated valley. Finally, the deltaic unit started approximately 8,000 yr cal. with the initiation of the deltaic progradation, which can be associated with the decrease of the rate in sea level rise (Guimarães, 2010).

Further studies have demonstrated that the development of the São Francisco River Delta is also related to subsidence due to normal faulting. Such faults promoted accommodation space for quaternary sediment deposition, and may be associated with tectonics or the gravitational collapse of the platform slope (Lima et al., 2014).

The coastal plain encompasses Holocene and Pleistocene sediments, which include Pleistocene alluvial fans, Pleistocene and Holocene beach-ridge terraces, lagoonal, fluvial and mangrove deposits, dunes and reefs (Barbosa and Dominguez, 2004).

Despite the different studies cited above, the study area still needs a better understanding of the main factors influencing its short term, considering the interconnection of factors that cause changes in coastline. To minimize this gap, the purpose of this study is to understand the behavior of the São Francisco river mouth in respect to climate change and evaluate if this river can still provide sediments to the coast. In this context, provide a better understanding of the São Francisco River dynamics (currents and morphodynamic of bedforms) and its influence on coastline changes.

MATERIALS AND METHODS

The dataset was composed of sonographic, hydrodynamic, seismic and sedimentological data. The data was acquired in two cruises, at the mouth of the São Francisco River (in Piaçabucú-AL), occurred in January 2009 and the September 2012. Fishing vessels were used for acquisition of: sonographic data, using a Side Scan Sonar model 272-TD from Edgetech, operating at a 500 kHz frequency; current velocity data, acquired with an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), model RDI Rio Grande, operating at a 1,200 kHz frequency; seismic data, acquired using a parametric sub-bottom profiler model SES 2000 from Innomar Technologie; and sedimentological data with a Van Veen grab sampler to get sediment samples.

Additionally, satellite images from 2009, 2012 and 2017 were used to estimate changes in coastline position during this period.

The bedforms characterization was done using the sonographic data, according to the classification adopted by Ashley (1990), with respect to bedforms sizes and shapes. Additionally, bedforms heights and lengths were measured using the seismic data.

The hydrodynamic characterization was done using the ADCP data concerning the flow velocities acquired in 2009 in longitudinal profiles in ebb and flood phase. In addition, river discharge and rainfall data from governmental agency (Ageência Nacional de Águas – ANA), measurements from a station at Propriá, were used. The Propriá station was chosen due to its proximity to the river mouth, being the closest among all stations possessing both discharge and rainfall data.

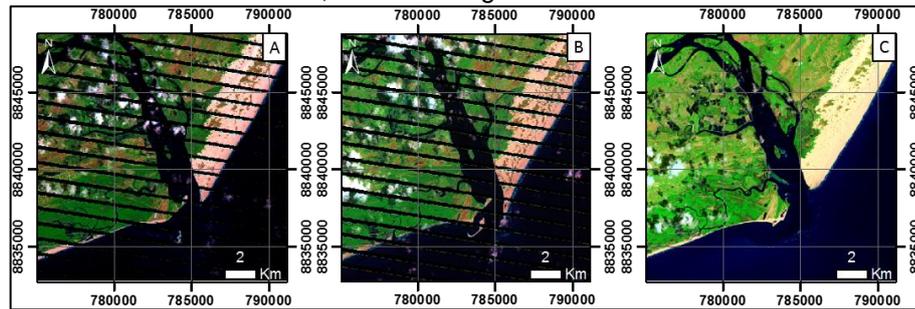
The sediment samples were analyzed to characterize the grain size and carbonate content. The classification was done according to the classification proposed by Vital et al. (2008).

The satellite image processing followed Amaro et al. (2012) and Souza et al. (2016) and consisted of four steps: i) images were selected for each period of data acquisition, ii) the images were georeferenced, iii) Digital Image Processing (DIP) techniques were applied to enhance the land-water contrast, and iv) the coast line was drawn for each image for further later comparison. The images were from LANDSAT sensors: Landsat-7 ETM+ from 01/14/2009 and 09/19/2012, and a Landsat-8 OLI scene from 12/14/2017.

DIP techniques were applied to enhance image visualization of the limit between dry and wet areas, by which the coast line was traced. A band composition of Red-Green-Blue (RGB) 742 from the ETM+ sensors and 753 for the OLI sensors were applied (Figure 2), with bands 7 and 4 in ETM+, and 7 and 5 in OLI representing infrared in the electromagnetic spectrum, turning the water dark due its high energy absorption. However, band 2 in ETM+, and band 3 in OLI, in the visible range, can penetrate the water, providing a great contrast between land and water, as well as between wet and dry sand.

A comparison among the three periods was made after tracing the coastlines for 2009, 2012 and 2017 (Figure 11 and Figure 12).

Figure 2: Landsat Composition. A: 2009 image Landsat 7 ETM+ R7G4B2; B: 2012 image Landsat 7 ETM+ R7G4B2; C: 2017 image Landsat 8 OLI R7G5B3



RESULTS

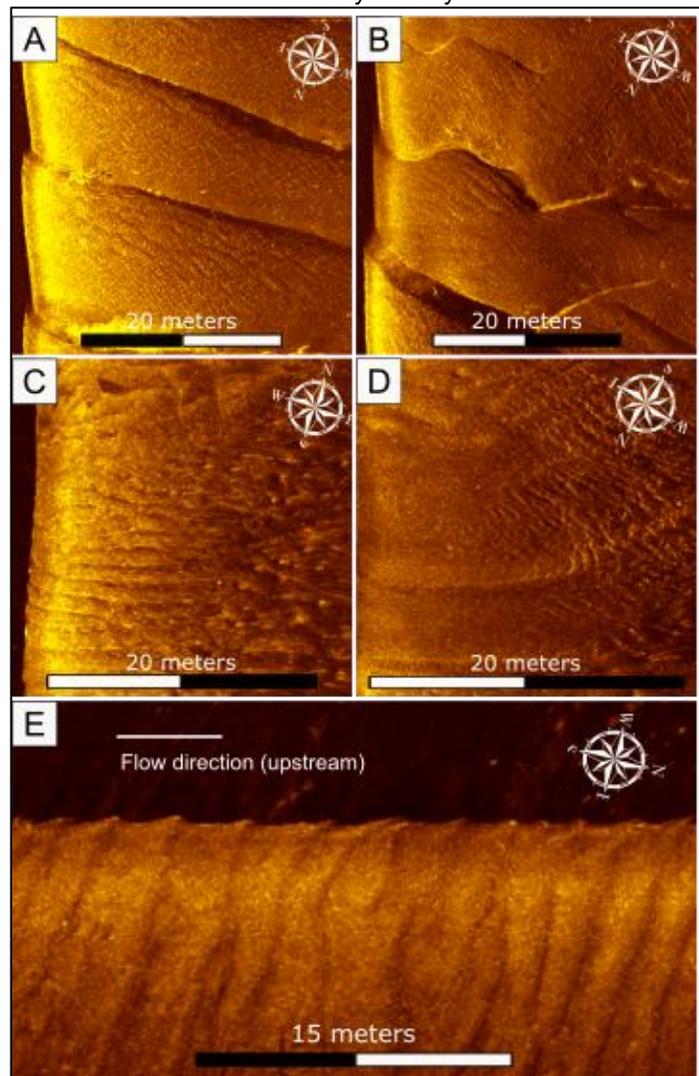
a. Sonographic data

The sonographic data covered only the navigable portions of the river area (Figure 1). The riverbed showed a great variety of bedforms (Figure 3), most of them being small dunes from 0.6 to 5 meters, medium dunes from 5 to 10 meters, and large dunes from 10 to 50 meters (Ashley, 1990). Additionally, it was possible to identify ripples (smaller bedforms) less than 0.6 m long. In regard to their shape, the bedforms occurred as 2-dimensional (straight-crested) and 3-dimensional (sinuous-crested). In most cases, large dunes were superimposed by smaller ones, which in turn were occasionally superimposed by ripples (forming a second group of superimposed bedforms). Sand ribbons and barchans dunes were rare.

Such bedforms occur overall the entire study area. In general, the dunes are larger upstream and decrease their size towards the river mouth. The dunes can reach more than 50 meters long in the upstream most part of the area. In the center part, the dunes range from 10 to 20 meters long. In contrast, at the river mouth, the dunes rarely reach 4 meters long. Ripples and plan beds occur mostly in the river margins, where low velocities occur.

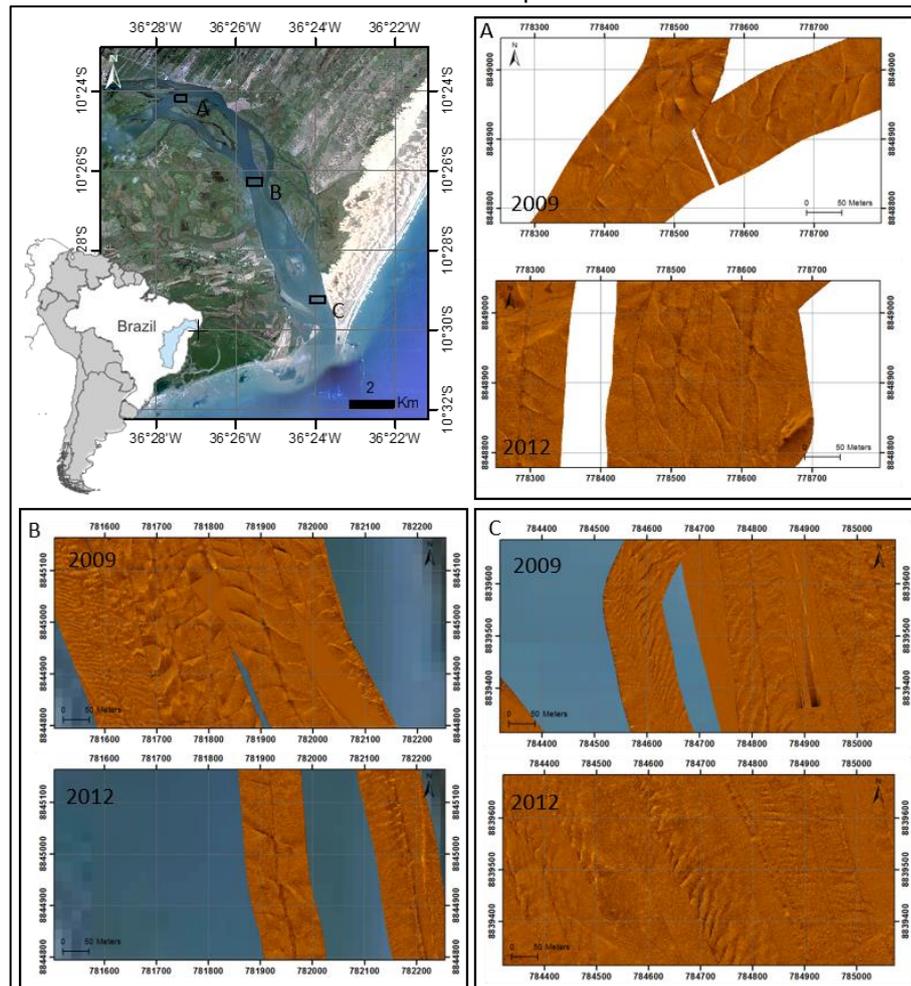
The bedforms predominantly exhibits an ebbing asymmetry; nevertheless, it is possible to find ripples and small dunes with flood asymmetry closer to the river mouth (Figure 3).

Figure 3: Variety of bedforms in the area. A: Very large 2D dunes with small dunes superimposed; B: Very large 3D dunes with small dunes superimposed; C: Small to medium 2D dunes; D: plan bed on left side and ripples and small dunes on right side; E: Small dunes close to the river mouth showing flood asymmetry.



Few changes in length, height and shape can be observed when comparing bedform data from 2009 to 2012 surveys. Figure 4A shows a comparison in the upstream portion of the river, where no changes were observed. For both periods, the bedforms are 2D ranging from 30 m to 45 m long, with superimposed dunes ranging from 1 to 4 m. In the center of the area, it is possible to observe a few changes (Figure 4B), and the 2D dunes from 2009 range from 30 m to 60 m long, while in 2012 they could reach 70 m long. There are 4 m long dunes superimposed on those bigger dunes in both periods (2009 and 2012). In the downstream portion, before the river mouth (Figure 4C), 2D dunes were observed ranging from 10 m to 22 m long with 2 m long dunes superimposed. This pattern occurred in both period (2009 and 2012).

Figure 4: Bedforms comparison between 2009 and 2012. A: Upstream portion. B: Center of the area. C: Downstream portion



b. Hydrodynamic data

The hydrodynamic data in 2009 showed some changes in flow direction and flow velocities. The directions are approximately to the north in flood phase, ranging from 300° Az to 013° Az. The directions are approximately to the south in ebb phase, ranging from 153° Az to 190° Az. The flow velocities were always greater in ebb phase than in flood phase (Figure 5).

The flow velocities were different according to the river side (Figure 6). On the east side, velocities were greater than the velocities on the west side. That difference also occurs in regards to depth since the east side is deeper than the west side (Figure 7).

The time series of rainfall data (January 2007 to June 2017) showed that the 2012 cruise was preceded by a greater volume of rainfall compared to 2009 cruise. During the period from June 2015 to March 2017, rainfall was scarce (Figure 8). The discharge data showed that the average monthly discharge was $2101 \text{ m}^3/\text{s}$ in 2012 and

1430 m³/s in 2009 (Figure 9). The annual average discharge between 2009 and 2012 was 2073 m³/s, with minimum of 1871 m³/s in 2010 maximum of 2190 m³/s in 2012. The river discharge started declining after 2012, and it has seen its smallest values over the last few decades. The time series of rainfall and discharge were compared to the annual quantity events of South Atlantic Convergence Zone – SACZ and El-Niño (Figure 10) (the SACZ index was taken from Quadro et al. (2016)).

Figure 5: Graphic of flow direction and flow speed in m/s. A) Flood phase. B) Ebb phase.

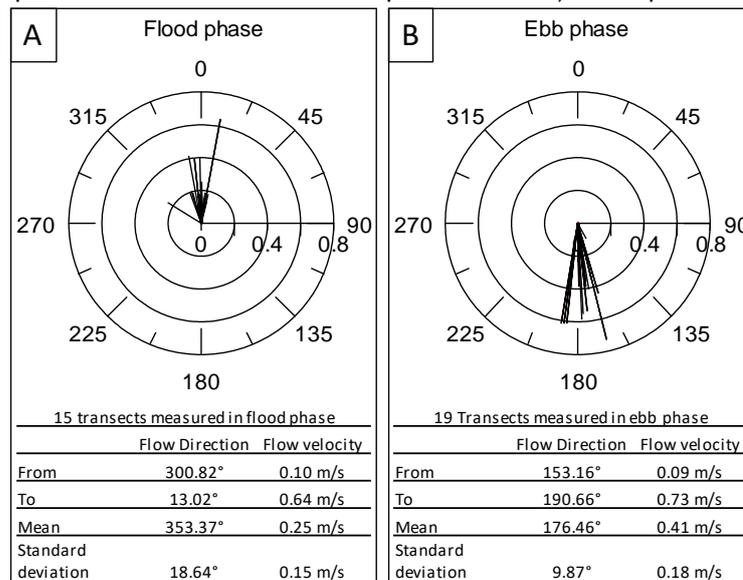


Figure 6: Variations in flow velocities according to river side

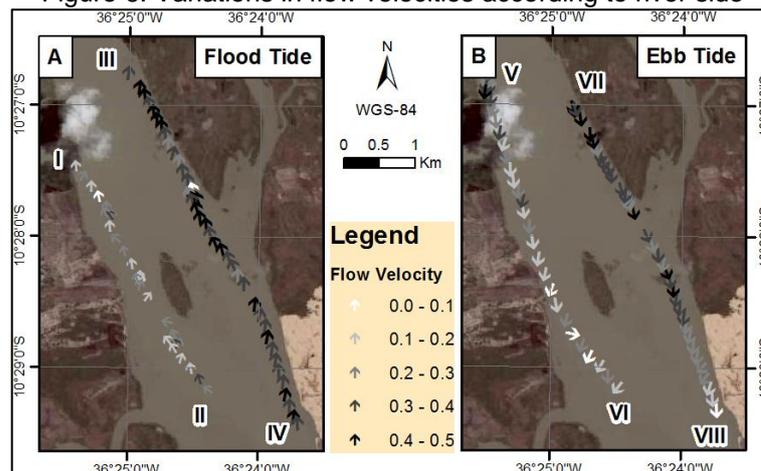


Figure 7: ADCP profile showing current velocity variations according to depth. Velocities are increased in greater depths.

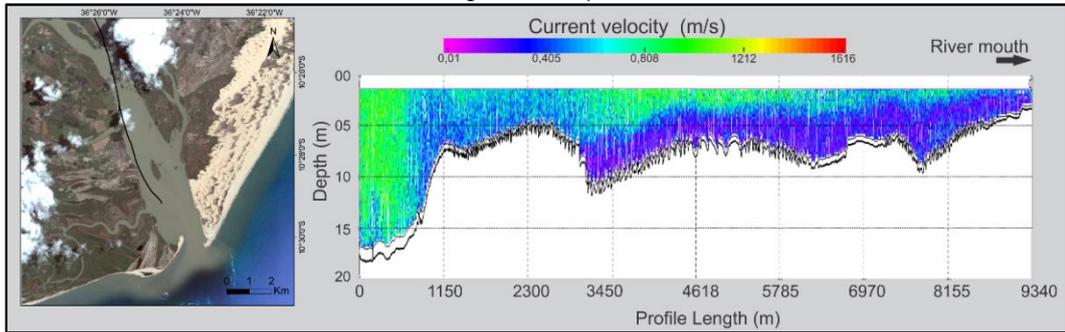


Figure 8: Monthly rainfall data extracted from INMET - National Institute of Meteorology of Brazil

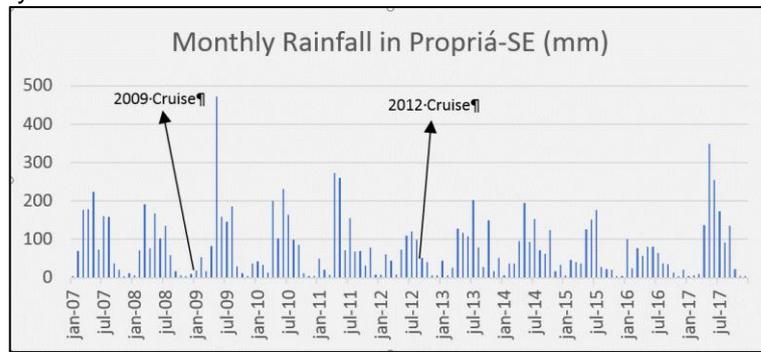


Figure 9: Monthly average discharge in Propriá-AL. The red dots are the discharge values for the periods of data acquisition. (Data extracted from ANA – Nation Agence of Water – Brazil)

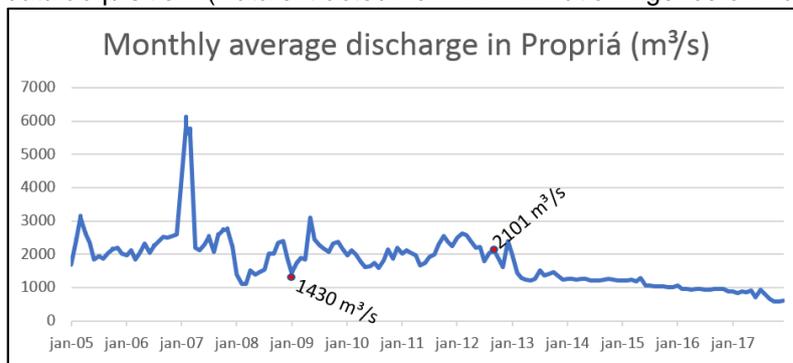
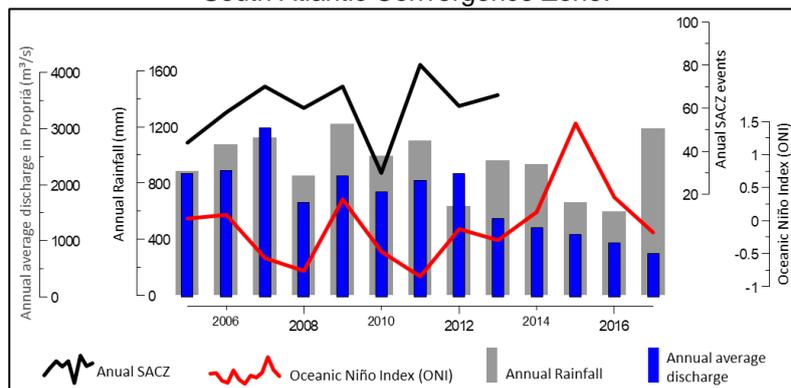


Figure 10 - Time series of annual average rainfall, annual average river discharge, El-Niño and South Atlantic Convergence Zone.



c. Seismic data

Two areas were compared to understand the changes in bedform patterns, the east side of the river (Figure 13), and the the west side (Figure 14). For both areas, we observed an increase in bedform length and heights. On the east side, the dunes ranged from 3.16 m to 30.66 m long and from 0.11 m to 1.03 m high in 2009. In 2012, the dunes ranged from 6.26 m to 51.28 m long and from 0.11 m to 1.1 m high, showing a general increase in dune length and height. On the west side, the dunes ranged from 1.97 m to 69.17 m long and from 0.03 m to 1.3 m high in 2009, while in 2012 from 3,92 m to 155,37 m long and 0,07 m to 1.56 m high, also showing an increase of length and height. In terms of mean values, a statistical analysis of dune parameters across the area reveal that in 2012 there was an increase in dune length and height. In 2009, the mean values of length and height were 12.07 m and 0.27 m, respectively, while in 2012, they were 34.99 m and 1.56 m, respectively. Therefore, an increase bedforms dimensions occurred from 2009 to 2012.

On the seismic record was identified a sub-horizontal surface over which the dunes were occurring, which was called migration surface. This horizon was used as baseline to estimate the variations in sediment content. In this case the amount of sediments above the migration surface was estimated for 2009 and 2012. In 2009, the area was 591 m², while in 2012, it was 668 m² (Figure 15), considering a 2D profile of depth and length. Considering that variation of dune shape is absent in a 10 meter wide area along those sections, there was an estimated sediment volume of 5910 m³ in 2009 and 6680 m³ in 2012. This represents a 13% increase of sediment volume above the migration surface.

d. Satellite image data

In general, accretion prevailed along the coastline adjacent to the delta area between 2009 and 2012 (Figure 11), as observed on the average ratio accretion/erosion of 1.73. At the NE portion, the accretion/erosion ratio was 4.12, whereas in the SW, it was 0.52. At the river mouth, occurred the development of a spit on the east side of the river mouth and a sand bar on the west.

On the other hand, between 2012 and 2017 prevailed an erosional scenario (Figure 12). The previous sand bar present in 2012 was completely eroded, as well as the sand bar on the west side. In addition, occurred the erosion of a spit located on the

west side of the river mouth. Comparing 2017 and 2012, it was observed that in the NE portion the accretion/erosion ratio was 0.03, whereas in the SW, it was 0.13.

Figure 11: Coast line trace (from 2009 to 2012) showing areas of erosion (red color) and accretion (green color), as well as the quantification of erosion and accretion in the study area. SW and NE are the sides according to the river mouth, and Bar is the sand bar in front of the river mouth.

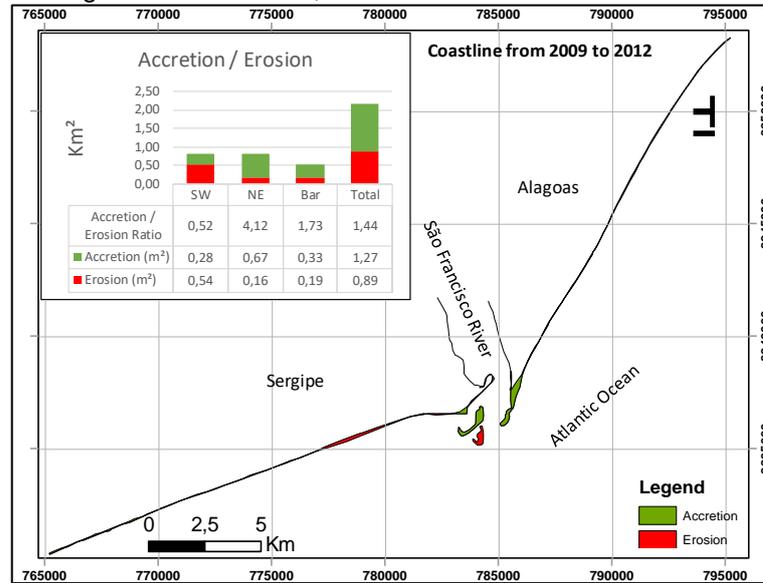


Figure 12: Coast line trace (from 2012 and 2017) showing areas of erosion (red color) and accretion (green color), as well as the quantification of erosion and accretion at the studied area. SW and NE are the sides according to the river mouth, and Bar is the sand bar in front of the river mouth.

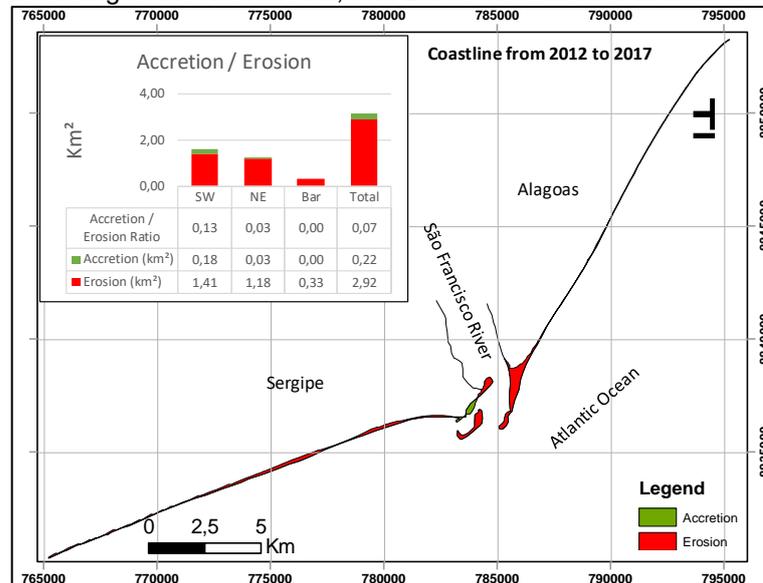


Figure 13: Bedform comparisons between profiles on the east side of the river. The map shows the location of profiles A (year 2009) and B (year 2012). The table shows the bedform measurements for each year.

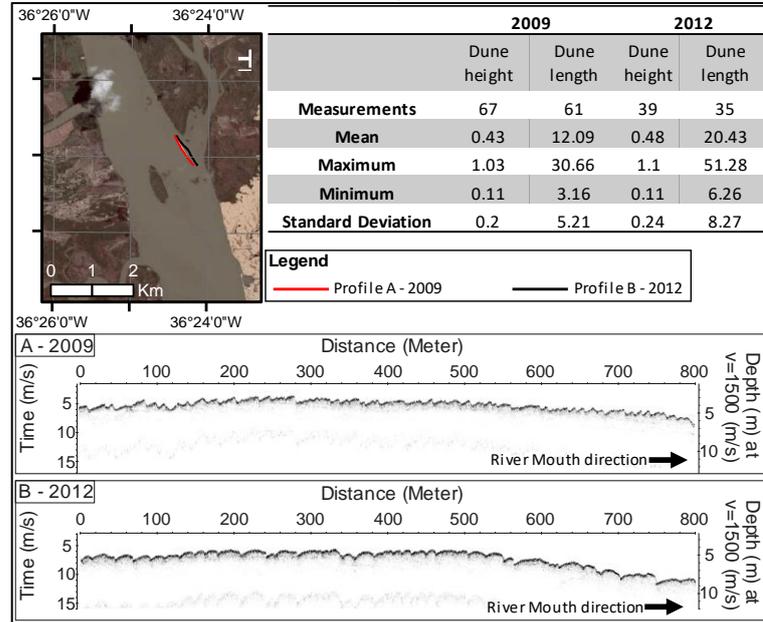


Figure 14: Bedform comparisons between profiles on the west side of the river. The map shows the location of profiles C (year 2009) and D (year 2012). The table shows the bedform measurements for each year.

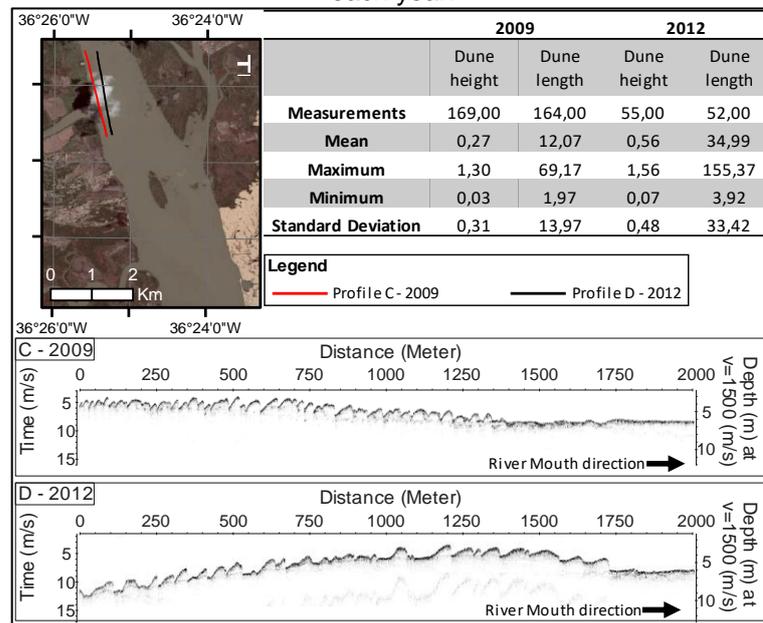


Figure 15: Sediment delimited above the migration surface to calculate the area. In A: 2009 data in B: 2012 data. A and B represent the same place.

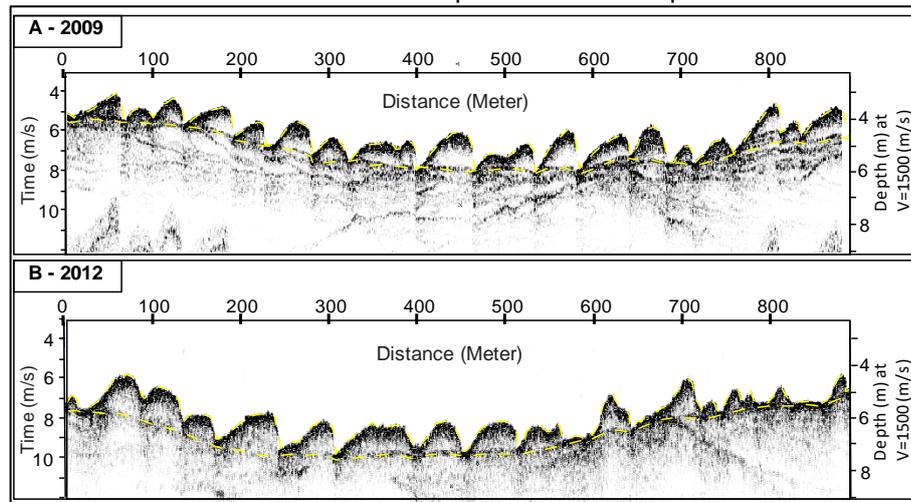
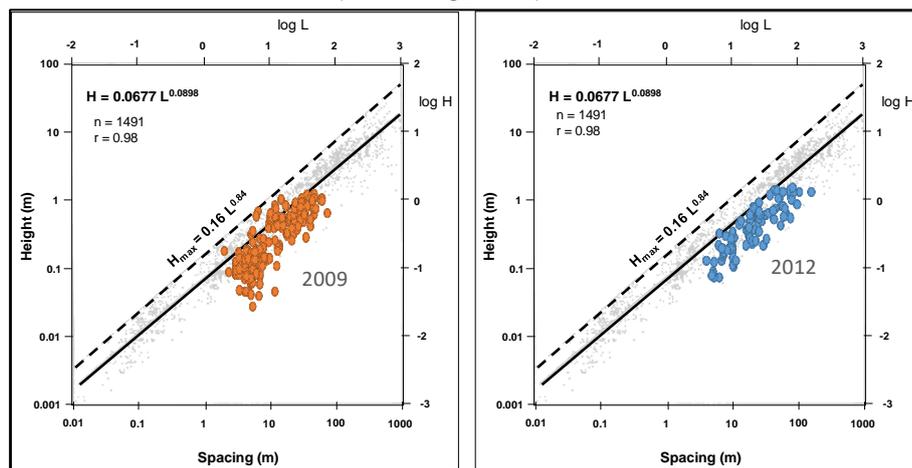


Figure 16: Scatter plot of Dune height versus dune spacing for 2009 and 2012, plotted over (Flemming, 2000) data.



e. Sedimentological data

The sedimentological data showed that the area is very homogeneous in terms of sediment grain size and type. The grain size of 7 samples was classified as medium sand and 2 as coarse sand. All samples were classified as siliciclastic sand according to Vita et al. (2008). The coarse sand samples were located in the center of the area, which is approximately 10 m deep. The area where the coarse sand were collected occur large dunes.

DISCUSSIONS

No considerable changes were noticed regarding bedform types between 2009 and 2012, as well as dune parameters (dune length and height) in all river sectors.

Such similarities suggest stable conditions between 2009 and 2012 in terms of sediment source for the river and flow stage (Tuijnder et al., 2009). During this period, occurred an increase in rainfall volume followed by an increase in river discharge. Such conditions favored the increase of bedload sediment transport, observed on the slight increase in bedforms dimensions (length and height). Greater changes on bedforms occurred in their lengths because water depth limits the height of the bedforms. On the other hand in length they can grow continuously whenever there is enough sediment supply and flow conditions (current velocity) (Venditti et al., 2016). The absence of sand ribbons and barchan dunes are a strong indicator that sediment supply for the river has not changed from 2009 to 2012 (Kleinhans et al., 2002). Therefore, the increase in sediment volume on some sections of the study area is likely to be related to increase in river discharge (Traini et al., 2012). In addition, the grain size uniformity indicated stable conditions in terms of sediment supply (Traini et al., 2012). Another indication of increase of sediment supply is the coastal stability and progradation that was observed along the delta coastline at the vicinities of the river mouth between 2009 and 2012 (Aquino da Silva et al., 2019).

Ebb phase tidal currents showed higher velocities than flood phase, indicating that more sediment is transported off the river than to inside the river. This can be noticed on the ADCP data as well on the bedforms that show ebb phase asymmetry. Therefore, considering a scenario of stability in terms sediment supply to São Francisco River, the variations on volume of sediment load is likely to be related to reduction in river discharge (Traini et al., 2012, Aquino da Silva et a., 2015). The analysis of the time series of rainfall, river discharge and climatic events revealed a good correlation between SACZ and rainfall. In this case, the erosional scenario observed at the river mouth between 2012 and 2017 can be attributed to the reduction of river discharge in this period. Since river discharge is directly influenced by variations in rainfall, it is possible to assume that the SACZ has an indirect influence on short term coastal morphodynamics (Aquino da Silva et al., 2015).

CONCLUSIONS

The multitemporal satellite images showed sediment accretion at the river mouth between 2009 and 2012 and coastline erosion between 2012 and 2017. The correlation between these coastline changes and the increase in rainfall (and

consequently river discharge) show that SACZ climatic events indirect influence coastal morphodynamics at the vicinity of the São Francisco River mouth, as well as exceptional events of El-Niño. Therefore, the river is still the major sediment supplier to the coast and is capable of providing sufficient sediment to maintain coastal stability. However, the reduction of river discharge severely decreases sediment load and impacts coastal morphodynamics. The coastal morphodynamic is very sensitive to changes in river discharge, hence, the coastline will try to reach an equilibrium every time a change in discharge occur. In this case, the river dams are the major anthropogenic impacts interfering on the relation between rainfall and discharge, threatening the delta coastline. Therefore, it is important to establish a threshold value over which coastal stability will prevail in relation to erosion, and use it as baseline for regulating the discharge of the several river dams along São Francisco River.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001", through a scholarship for the first author. We would like to acknowledge the Projects Northern Brazilian river deltas: River impacts versus pristine discharge (DFG - Deutsche Forschungsgemeinschaft), and grant PQ nº311413/2016-1 – Margem Equatorial Brasileira: Da Fonte a Deposição (CNPQ - Brazilian National Council for Scientific and Technological Development) for financing this study. Thanks are also due for the support in the cruise for the team of GGEMMA lab in Federal University of Rio Grande do Norte, the team of Federal University of Bahia (Brazil), the team of Kiel University, and the crew of the Captain of Ousado Vessel. This is a contribution to INCT AmbTropic – Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia “Ambientes Marinhos Tropicais” (Heterogeneidade Espaço-Temporal e Respostas a Mudanças Climáticas (CNPq – FAPESB – CAPES).

5. Considerações Finais

5.1. Conclusões e Recomendações

A análise multitemporal, por imagens de satélite, indicou acreção de sedimentos na foz do rio entre os anos de 2009 e 2012 e erosão costeira entre os anos de 2012 e 2017. Esses dados estão de acordo com as variações nos regimes de chuvas e de vazão do rio.

Os dados sugerem que o rio foi o principal provedor de sedimentos para a costa, embora as barragens tenham afetado o suprimento de sedimentos para a costa nas últimas décadas. O principal fato corroborando com essa afirmação foi a acreção de sedimentos na costa, bem como o aumento das formas de leito entre os anos de 2009 e 2012.

O rio teve um incremento na descarga entre 2009 e 2012, quando comparado com 2008. Entretanto, pode-se dizer que a descarga do rio foi muito similar entre 2009 e 2012. Isto sugere que o rio estava em um equilíbrio costeiro neste período.

Ficou claro que o aumento da vazão do rio e das chuvas, entre 2009 e 2012, foram os responsáveis pelo aumento no suprimento de sedimentos. Entretanto, a relação entre chuvas e vazão poderiam ter uma melhor correlação se a descarga do rio não tivesse um controle humano nas barragens.

Depois de 2012, até 2017, houve um decréscimo relevante na vazão do rio, alcançando os menores valores das últimas décadas. Este decréscimo foi responsável por uma menor quantidade de sedimentos trazidos pelos rios e alcançando a costa. Esta pequena quantidade de sedimentos pode ser explicada pelo forte evento El Niño de 2015, resultando em poucas chuvas de junho de 2015 até março de 2017.

O Rio São Francisco é a principal fonte de sedimentos para a costa, entretanto, ele é muito sensível às mudanças de intensidade das vazões. Este rio irá encontrar um novo ponto de equilíbrio sempre que houverem mudanças dessas vazões. Desta maneira, este rio irá continuar a experimentar erosão costeira se a descarga continuar em níveis baixos.

Um monitoramento se faz necessário para registrar as mudanças ocorridas na área de estudo. Novas caracterizações das formas de leito poderiam indicar se ainda existe um suprimento suficiente de sedimentos, bem como a preferência do fluxo registrado pela assimetria das dunas. Imagens de satélite multitemporais poderiam

avaliar a estabilidade da costa, dados de velocidade das correntes e amostras de sedimentos poderiam avaliar a energia do rio. Enquanto que chuvas e dados de vazão poderiam explicar os períodos de suprimento de sedimentos e os períodos de déficit de sedimentos. Este monitoramento proveria dados suficientes para estabelecer uma zona de transição, em que a linha de costa poderia variar, bem com estabelecer um range ideal de valores de descarga para o rio São Francisco.

Referências Bibliográficas

- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Amaro, V.E., Santos, M.S.T., Souto, M.V.S., 2012. *Geotecnologias Aplicadas ao Monitoramento Costeiro: Sensoriamento Remoto e Geodésia de Precisão*. Edição do Autor, Natal.
- Ashley, G.M., 1990. Classification of Large-Scale Subaqueous Bedforms: A New Look at an Old Problem-SEPM Bedforms and Bedding Structures. *J. Sediment. Res.* 60, 160–172. <https://doi.org/10.2110/jsr.60.160>
- Aubrey, D.G., Speer, P.E., 1985. A Study of Non-linear Tidal Propagation in shallow inlet / estuarine systems Part I : Observations. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 21, 185–205. [https://doi.org/doi:10.1016/0272-7714\(85\)90096-4](https://doi.org/doi:10.1016/0272-7714(85)90096-4)
- Barbosa, L.M., Dominguez, J.M.L., 2004. Coastal dune fields at the São Francisco River strandplain, northeastern Brazil: Morphology and environmental controls. *Earth Surf. Process. Landforms* 29, 443–456. <https://doi.org/10.1002/esp.1040>
- Bhattacharya, J.P., 2006. Deltas, in: *Facies Models Revisited*. pp. 237–292. <https://doi.org/10.2110/pec.06.84.0237>
- Bittencourt, A.C.D.S.P., Dominguez, J.M.L., Fontes, L.C.S., Sousa, D.L., Silva, I.R., Da Silva, F.R., 2007. Wave Refraction, River Damming, and Episodes of Severe Shoreline Erosion: The São Francisco River Mouth, Northeastern Brazil. *J. Coast. Res.* 23, 930–938. <https://doi.org/10.2112/05-0600.1>
- Bjørnø, L., 2017. Sonar Systems, in: Neighbors, T., Bradley, D. (Eds.), *Applied Underwater Acoustics: Leif Bjørnø*. Elsevier, pp. 587–742. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811240-3.00010-2>
- Dominguez, J.M.L., 1996. The Sao Francisco strandplain: a paradigm for wave-dominated deltas? *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 117, 217–231. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.117.01.13>
- Dominguez, J.M.L., Martin, L., Bittencourt, A.C. da S.P.A.C. da S.P., 2003. Episodes of severe erosion in the Jequitinhonha river strandplain caused by changes in river discharge and coastal wave climate, IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário.

- Dominguez, J.M.L., Silva, R.P. da, Nunes, A.S., Freire, A.F.M., 2013. The narrow, shallow, low-accommodation shelf of central Brazil: Sedimentology, evolution, and human uses. *Geomorphol. J.* 203, 46–59.
- Flemming, B.W., 2013. Comment on “Large-scale bedforms along a tideless outer shelf setting in the western Mediterranean” by Lo Iacono et al. (2010) in *Continental Shelf Research* vol 30, pp. 1802-1813. *Cont. Shelf Res.* 52, 203–207. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.11.012>
- Flemming, B.W., 2000. The role of grain size, water depth and flow velocity as scaling factors controlling the size of subaqueous dunes. *Mar. Sandwave Dyn.* 55–61.
- Freire, G.S.S., Cavalcanti, V.M.M., Maia, L.P., Lima, S.F., 1997. Classificação dos Sedimentos da Plataforma Continental do Estado do Ceará, in: *In: Simpósio de Geologia Do Nordeste*. Fortaleza-CE, pp. 209–211.
- Galloway, W.D., 1975. Process Framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. *Deltas, Model. Explor.* 86–98.
- GEOLOGIA MARINHA E COSTEIRA, 2010. GEOLOGIA MARINHA E COSTEIRA: The São Francisco Delta.
Disponível em: <http://geologiamarinha.blogspot.com/2010/03/sao-francisco-delta.html>
Acesso em 10.10.18.
- Grill, G., Lehner, B., Lumsdon, A.E., MacDonald, G.K., Zarfl, C., Reidy Liermann, C., 2015. An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales. *Environ. Res. Lett.* 10, 15001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/1/015001>
- Guimarães, J.K., 2010. Evolução do delta do rio São Francisco - estratigrafia do Quaternário e relações morfodinâmicas. Tese (Doutorado em Geologia Marinha, Costeira e Sedimentar), Curso de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia, Bahia.
- Kleinhans, M.G., Wilbers, A.W.E., Swaaf, A. De, Berg, J.H. Van Den, 2002. Sediment Supply-Limited Bedforms in Sand-Gravel Bed Rivers. *J. Sediment. Res.* 72, 629–640. <https://doi.org/10.1306/030702720629>
- Köppen, G.W., 1936. Das geographische System der Klimate:, in: Köppen, G.W., Geiger, M.R. (Eds.), *Handbuch Der Klimatologie*. Gebrüder Bornträger, Berlin,

- pp. 1–44.
- Lima, C.C.U., Bezerra, F.H.R., Nogueira, F.C.C., Maia, R.P., Sousa, M.O.L., 2014. Quaternary fault control on the coastal sedimentation and morphology of the São Francisco coastal plain, Brazil. *Tectonophysics* 633, 98–114.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.06.026>
- Mazel, C., 1985. Side scan sonar training manual. New York.
- Möller Jr, O., Abe, M.P., 2011. OCEANOGRAFIA FÍSICA, in: Estudos Oceanográficos: Do Instrumental Ao Prático. Textos, Pelotas, pp. 108–129.
- Nichols, G., 2009. *Sedimentology and Stratigraphy*, 2nd ed. Wiley-blackwell, Oxford.
- Nimer, E., 1979. Um modelo metodológico da classificação de climas. *Rev. Bras. Geogr.* 41, 59–89.
- Oliveira, A.M. de, Júnior, R.C. dos S., Hernandez, A. de O., Segundo, G.H.C., Araújo, A.E. de M., 2003. A MORTE DO DELTA DO RIO SÃO FRANCISCO. An. IX Congr. da ABEQUA (Recife, Brazil).
- Petrescu, F.I., 2012. A New Doppler Effect. BoD–Books on Demand, Norderstedt.
- Pianca, C., Luigi, P., Mazzini, F., Siegle, E., 2010. BRAZILIAN OFFSHORE WAVE CLIMATE BASED ON NWW3 REANALYSIS, BRAZILIAN JOURNAL OF OCEANOGRAPHY.
- Quadro, M.F.L. De, Pezzi, L.P., Rosa, E.B., 2016. O Climanálise e o monitoramento da ZCAS nos últimos 30 anos. *Rev. Climanálise* 4, 29–25.
- Rossetti, D.F., Bezerra, F.H.R., Dominguez, J.M.L., 2013. Late oligocene-miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of brazil. *Earth-Science Rev.* 123, 87–112. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.005>
- Rossetti, D.F., Bezerra, F.H.R., Góes, A.M., Neves, B.B.B., 2011. Sediment deformation in Miocene and post-Miocene strata, Northeastern Brazil: Evidence for paleoseismicity in a passive margin. *Sediment. Geol.* 235, 172–187.
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.02.005>
- Souza, C.D. de, Silva, R.M.N. da, Rodrigues, L.I. de C., Mororó, E.A.A., Duarte, C.R., Souto, M.V.S., Sabadia, J.A.B., 2016. Emprego de imagens Landsat na análise temporal da linha de costa da porção oeste do estado do Ceará. *Rev. Geol.* 29, 181–194.
- Souza, L.A.P. de, 2006. Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas. Universidade de São Paulo.
- Syvitski, J.P.M., Vörösmarty, C.J., Kettner, A.J., Green, P., 2005. Impact of Humans

- on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean. *Science* (80-.). 308, 376–380. <https://doi.org/10.1126/science.1109454>
- Traini, C., Schrottke, K., Stattegger, K., Dominguez, J.M.L., Guimarães, J.K., Vital, H., Beserra, D., da Silva, A.A., 2012. Morphology of Subaqueous Dunes at the Mouth of the Dammed River São Francisco (Brazil). *J. Coast. Res.* 285, 1580–1590. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-10-00195.1>
- Tuijnder, A.P., Ribberink, J.S., Hulscher, S.J.M.H., 2009. An experimental study into the geometry of supply-limited dunes. *Sedimentology* 56, 1713–1727. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2009.01054.x>
- Venditti, J.G., Lin, C.Y.M., Kazemi, M., 2016. Variability in bedform morphology and kinematics with transport stage. *Sedimentology* 63, 1017–1040. <https://doi.org/10.1111/sed.12247>
- Vital, H., Oliveira, A.M. De, Werner Farkatt Tabosa, 2001. Caracterização de Padrões de Formas de Fundo da Foz do Rio São Francisco. *Pesqui. em Geociencias* 7.
- Vital, H., Stattegger, K., Amaro, V.E., Schwarzer, K., Frazão, E.P., Tabosa, W.F., Silveira, I.M., 2008. A Modern High-Energy Siliciclastic–Carbonate Platform: Continental Shelf Adjacent to Northern Rio Grande Do Norte State, Northeastern Brazil. *Recent Adv. Model. Siliciclastic Shallow-Marine Stratigr.* 177–190. <https://doi.org/10.2110/pec.08.90.0177>
- Wright, L.D., Coleman, J.M., 1973. Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* <https://doi.org/10.1306/819A4274-16C5-11D7-8645000102C1865D>