



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

ALLISON DE OLIVEIRA MAIA

**RECONSTRUÇÃO AMBIENTAL E EVOLUÇÃO SEDIMENTAR DA REGIÃO
COSTEIRA DE ICAPUÍ/CE POR MEIO DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE
IMAGENS E ANÁLISE DE FÁCIES**

FORTALEZA

2017

ALLISON DE OLIVEIRA MAIA
RECONSTRUÇÃO AMBIENTAL E EVOLUÇÃO SEDIMENTAR DA REGIÃO
COSTEIRA DE ICAPUÍ/CE POR MEIO DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE
IMAGENS E ANÁLISE DE FÁCIES

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geologia, do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geologia Marinha e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Michael Vandesteem
Silva Souto

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a Cynthia Romariz
Duarte

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M184r Maia, Allison de Oliveira.

Reconstrução ambiental e evolução sedimentar da região costeira de Icapuí/CE por meio de processamento digital de imagens e análise de fácies / Allison de Oliveira Maia. – 2017.
92 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Michael Vandesteen Silva Souto.

Coorientação: Prof. Dr. Cynthia Romariz Duarte.

1. Cordões Litorâneos. 2. Planície Costeira. 3. Quaternário. 4. Evolução Sedimentar. I. Título.

CDD 551

*Agradeço a Deus, aos meus pais,
E a todos aqueles que,
De uma forma ou de outra,
Fizeram parte de mais uma das minhas jornadas!*

Tudo tem o seu tempo determinado,
e há tempo para todo o propósito debaixo do céu

Eclesiastes 3:1

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido toda a força, coragem, inteligência, sabedoria, paciência e determinação que foram necessárias para a confecção deste trabalho, pois Ele sabe o quanto foi difícil para mim seguir em frente em muitos momentos desse trabalho,

À Universidade Federal do Ceará, na figura do nosso magnífico reitor Prof. Henry de Holanda Campos e dos outros gestores que vieram antes dele, por suas contribuições na minha vida acadêmica através das suas atuações como reitores da UFC,

Ao Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE), por ter sido a minha casa e o meu local de trabalho por estes dois anos, e por terem me acolhido numa das horas mais difíceis da minha vida, e por terem me permitido a oportunidade de aprender tantas coisas sobre a geologia em diversos aspectos,

Ao Laboratório de Geologia Marinha (LGMA), nas pessoas do Prof. Satander, por sua cooperação com este trabalho, e do Sr. Edilson, pela “forcinha” na atividade de campo e pela dedicação para com o meu trabalho,

À FUNCAP pela concessão de bolsa de mestrado durante os últimos dois anos,

Às pessoas mais importantes da minha vida: meus pais (Nileide e Célio), que sempre fizeram o seu melhor para que nunca me faltasse nada, e que tornaram possível a realização deste trabalho. Pai, por acreditar em mim e nos meus sonhos, e mãe, por sempre me apoiar e me aconselhar nas minhas decisões, o meu muito obrigado! Este trabalho só foi possível devido ao esforço ininterrupto de vocês!

Aos professores e funcionários do Departamento de Geologia, que tanto dentro como fora da sala de aula, foram não somente professores, mas verdadeiros companheiros e amigos, sempre fornecendo de forma prestativa o seu apoio tanto acadêmico como motivacional. Deixo aqui meus sinceros agradecimentos a todos vocês, e principalmente, aos meus orientadores, Prof. Michael e Prof. Cynthia, que mesmo diante de tantas responsabilidades e atribuições, ainda encontravam tempo para me guiar e me orientar neste trabalho,

Ao Prof. Dr. Daniel Rodrigues, pela sua imensurável contribuição na descrição dos testemunhos, na interpretação dos dados e na dissertação como um todo. Tenho certeza que, sem a sua ajuda, este trabalho não teria sido possível. Muito obrigado!

A todos os colegas do GEOCE, que tiveram papel fundamental durante o dia-a-dia da produção deste trabalho, com destaque para o Cláudio, pela sua ajuda fundamental durante o andamento do trabalho.

Também gostaria de deixar meus agradecimentos aos meus amigos de fora da UFC, que mesmo sem contribuir diretamente neste trabalho, participaram de momentos que me permitiam relaxar e esquecer um pouco dos problemas que sempre se apresentavam na minha vida acadêmica, com agradecimentos especiais ao meu amigo Leo, que sempre esteve ao meu lado nos momentos de alegria e de aflição, e considero uma pessoa que posso sempre contar,

E como não poderia deixar de ser, gostaria de deixar meus agradecimentos à minha namorada Karine, que além de namorada, têm sido minha companheira, minha amiga e alguém com quem posso contar nos momentos de tensão. Obrigado por estar ao meu lado, meu amor!

E a todos aqueles que não foram citados aqui, mas que de uma forma ou de outra me ajudaram em algum momento destes dois anos, peço desculpas pela ausência aqui e reforço meus agradecimentos. Obrigado a todos vocês!

RESUMO

Este estudo foi realizado na planície costeira do município de Icapuí, que está localizado no extremo leste do litoral do estado do Ceará, e teve como objetivo a compreensão dos fenômenos associados à dinâmica costeira da região. A deposição dos sistemas de cordões litorâneos poderia ter sofrido influência de reativações quaternárias do sistema de falhas Carnaubais (NE) e Afonso Bezerra (NO) e dos lineamentos Ponta Grossa – Fazenda Belém (NNE-SSO), que parecem ser um dos principais mecanismos que controlam a deposição na região, sugerindo uma forte influência neotectônica na construção da morfologia costeira ao longo do quaternário superior. Por meio do uso de imagens de sensoriamento remoto, coleta de testemunhos e análise e descrição de fácies associada à análise granulométrica, foram caracterizadas 14 fácies arenosas nos sete testemunhos de sondagem, com predominância de materiais classificados como areia fina moderadamente selecionada com assimetria predominantemente negativa, onde em algumas fácies foi possível estabelecer relações genéticas através da análise de três perfis, localizados nas porções leste, central e oeste da área de estudo. Baseado nos dados obtidos, foi possível construir um modelo de evolução que teve início com o surgimento de um esporão arenoso na cidade de Tibau-RN, que cresceu de forma paralela à linha de costa até onde encontra-se atualmente o município de Icapuí, favorecendo a deposição por agradacão na região retrobarreira e a subsequente migração do canal de maré do sentido SE-NO para S-N, configuração compatível com a atual morfologia do litoral.

Palavras-chave: Cordões Litorâneos. Planície Costeira. Quaternário. Evolução Sedimentar.

ABSTRACT

This study was developed in the coastal plain of Icapuí, which is located in the eastern coast of the state of Ceará, located at Brazilian northeast, and aimed to understand the sedimentary evolution related with the local coastal dynamics. The formation of continental beach ridges system seems to be influenced, in a regional perspective, by quaternary reactivations of a pair of conjugated faults composed by Carnaubais Fault (NE direction) and the Afonso Bezerra Fault (NW direction) and, in a local view, by Ponta Grossa – Fazenda Belém lineament (NNE-SSW), which appears to be one of the main mechanisms controlling deposition, suggesting a strong neotectonic influence on coastal morphology along the upper quaternary. Through the use of remote sensing images, sample collection and facies description in seven core samples, associated with granulometric and statistical analysis, was possible to describe 14 sandy facies dominated by fine-grained moderately-sorted with negative-asymmetric sediments. In some facies, was possible to see genetic relations using the analysis of three profiles in the study area, located in the eastern, central and western portions. Based on all the data obtained, it was possible to propose an evolution template that starts with the development of a spit in Tibau-RN, which developed parallel to the coastline to where the municipality of Icapuí is nowadays, promoting the backbarrier aggradation and the subsequent migration of the tidal channel from the SE-NW direction to S-N, a configuration compatible with the current coastline morphology.

Keywords: Beach Ridges. Coastal Plain. Quaternary. Sedimentary Evolution.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	Apresentação	8
1.2	Localização e vias de acesso da área	10
1.3	Motivação	12
1.4	Objetivos	12
1.5	Contexto geodinâmico	13
1.6	Cordões litorâneos	16
1.7	Considerações sobre os estudos de ambientes quaternários.....	23
2	METODOLOGIA APLICADA.....	26
2.1	Introdução	26
2.2	Materiais	27
2.3	Métodos.....	29
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
3.1	Sensoriamento remoto e PDIs.....	47
3.2	Descrição de testemunhos	60
3.3	Análise granulométrica	69
3.4	Tratamento estatístico das análises granulométricas	70
3.5	Análise de perfis.....	75
3.6	Evolução sedimentar	80
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
4.1	Conclusões	83
4.2	Recomendações	88
	REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado faz parte de uma parceria feita entre a Universidade Federal do Ceará (UFC) e a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), respectivamente representadas pelo Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE) e pelo Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO), cuja finalidade, dentre outras linhas de pesquisa desenvolvidas, é a compreensão dos fenômenos geológicos no litoral setentrional no nordeste do Brasil, principalmente aqueles relativos aos litorais potiguar e cearense, objetivando compreender de modo mais abrangente a sua dinâmica e evolução, para assim contribuir com o desenvolvimento do conhecimento acerca da influência de processos neotectônicos nos depósitos quaternários existentes no litoral do município de Icapuí/CE, bem como contribuir para aprofundar o conhecimento a respeito da evolução quaternária e das fácies sedimentares encontradas neste ambiente.

A evolução costeira quaternária no nordeste brasileiro, particularmente no setor entre Natal e Fortaleza tem sido objeto de investigação de diversos autores. Os estudos estão focados na hidrodinâmica e deposição sedimentar recente (TESTA e BOSENCE, 1998; VITAL et al., 2002), nos estudos de neotectônica (BEZERRA et al., 1998; SILVA FILHO, 2004; MESQUITA, 2015), e nos estudos de estratigrafia do quaternário e flutuações do Nível Relativo do Mar (NRM) (SILVA, 1991; BARRETO et al., 2002; BEZERRA; BARRETO; SUGUIO, 2003) e visam contribuir para o entendimento dos processos costeiros sedimentares recentes e pretéritos.

Desde a década de 1970, diversos autores vêm realizando estudos para tentar compreender os processos agentes da dinâmica costeira das praias do estado do Ceará. Esses estudos apresentam aspectos sobre a compartimentação territorial e gestão da zona costeira, zoneamentos geoambientais, controle neotectônico, evolução sedimentológica das praias, aspectos morfodinâmicos e geoquímicos das praias oceânicas e estuarinas (MARINO e FREIRE, 2013). De forma resumida, estes estudos abrangem três mecanismos principais de estruturação da morfodinâmica costeira: as variações climáticas, as variações no Nível Relativo do Mar (NRM) e as reativações neotectônicas.

O clima constitui uma das mais abrangentes variáveis controladoras dos processos costeiros (MORAIS *et. al.*, 2006), principalmente no que diz respeito às variações no

NRM. Inúmeros trabalhos, inclusive alguns dos citados acima, têm se dedicado a compreender como as variações no NRM e as mudanças climáticas influenciaram os ambientes costeiros, tendo em vista o seu caráter amplo de atividade no litoral.

No estado do Rio Grande do Norte, os estudos de Bezerra (1998), Bezerra, Barreto e Suguio (2003) e Stattegger, Caldas e Vital (2006) têm se dedicado a compreender as variações do NRM na porção setentrional do litoral. Entretanto, não há um consenso se o atual NRM corresponde ao seu nível máximo (BEHLING, COHEN e LARA, 2001; COHEN *et al.*, 2005; SOUZA FILHO, MARTINS e COSTA, 2006) ou se este ocorreu entre 5 a 6 mil anos AP (BARROS, 2005; CALDAS *et al.*, 2006; VASCONCELOS, 2014). Portanto, devido à pequena quantidade de dados de variação do NRM referentes ao estado do Ceará (BARROS, 2005; VASCONCELOS, 2014; MESQUITA, 2015), e conseqüentemente ao município de Icapuí (MEIRELES *et al.*, 2005), não é possível estabelecer quaisquer discussões aprofundadas sobre o tema, sendo mais sensato abordar a influência do NRM na área de estudo de forma mais parcimoniosa.

A neotectônica, até então pouco abordada como resultado da interação entre estruturas geológicas e processos dinâmicos marinhos e climáticos, vem sendo difundida como forte controladora nas alterações nas taxas de sedimentação, oscilações do nível marinho e espaço de acomodação, resultando assim na criação de novas feições geomorfológicas costeiras (KENNEDY, 2011; FEAGIN *et al.*, 2013). Devido a sensibilidade dos ambientes costeiros às modificações através de movimentos diferenciais de blocos, a neotectônica deve ser considerada em qualquer análise geomorfológica e sedimentológica que visa reconstruir evoluções ambientais em áreas litorâneas perto de zonas de grandes discontinuidades estruturais (REY e FUMANAL, 1996, ULUĞ *et al.*, 2005).

Estudos que abordem a inter-relação entre tectônica, sedimentação costeira e sua relação com variações relativas no NRM são pouco numerosos para o litoral setentrional do Brasil (BEZERRA; VITA-FINZI, 2000; BEZERRA; BARRETO; SUGUIO, 2003), e inexistentes para o litoral leste do Ceará, de forma que a presente dissertação apresenta um caráter pioneiro, embora preliminar, para a região.

Baseado nisso, a presente dissertação de mestrado se concentra na porção do extremo oeste da Bacia Potiguar e visa propor hipóteses a respeito da evolução da planície costeira de Icapuí, e sua relação com os cordões litorâneos presentes na região, a partir

do uso de técnicas como Sensoriamento Remoto e Processamento Digital de Imagens (PDI), além de técnicas de testemunhagem, análise granulométrica e análise estatística de dados de granulometria.

Um fator de destaque para a região é que a presença de cordões litorâneos é relativamente incomum dentro do cenário costeiro cearense. Isso confere à área uma relevância considerável dentro do contexto geológico do quaternário da região pesquisada, além de contribuir com o conhecimento da gênese de cordões litorâneos de uma forma geral, já que sua formação ainda não é totalmente compreendida. Além disso, acrescentará conhecimento sobre como a neotectônica, as variações no NRM, as mudanças climáticas e a hidrodinâmica costeira têm agido no litoral leste do estado do Ceará, e trará a luz do conhecimento para a forma do comportamento geológico no futuro, proporcionando uma compreensão mais aprofundada sobre os eventos holocênicos que têm moldado o litoral da área de estudo.

1.2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO DA ÁREA

Do ponto de vista geomorfológico, os cordões litorâneos estão situados na região da planície costeira e estão geneticamente relacionados à sedimentação quaternária posterior ao último máximo nível médio do mar, que ocorreu entre 6.000-5.900 anos cal AP (STATTEGGER; CALDAS; VITAL, 2006). Segundo Souza et al., (1994), as planícies costeiras geralmente são compostas por uma faixa praial, terraços marinhos, campos de dunas móveis e/ou fixas, paleodunas, corpos lagunares, planícies ribeirinhas e planícies fluviomarinhas com manguezais. Na planície litorânea de Icapuí, de acordo com Oliveira (2012), encontram-se algumas feições geomorfológicas, tais como: falésias ativas e inativas; dunas móveis e fixas; cordões litorâneos; faixa de praia, terraços marinhos e canais de maré.

A área de estudo está situada entre as coordenadas UTM zona 24 Sul, pelo Datum SIRGAS 2000, entre as longitudes 677.000-690.000 m Easting e entre as latitudes 9.483.000-9.475.000 m Northing, situada no município de Icapuí, no estado do Ceará, que faz limite com o estado do Rio Grande do Norte (Figura 1.1). O acesso à área de estudo (Figura 1.2), partindo da capital Fortaleza, se dá pela rodovia estadual CE-040, percorrendo cerca de 181 km até chegar a entrada do Distrito de Tanque de Lima, a esquerda da pista, onde se segue para a cidade-sede de Icapuí por mais 24 km pela rodovia

estadual CE-261, perfazendo um total de 205 km entre as duas cidades e com tempo gasto de deslocamento estimado em quase 3 horas de viagem.

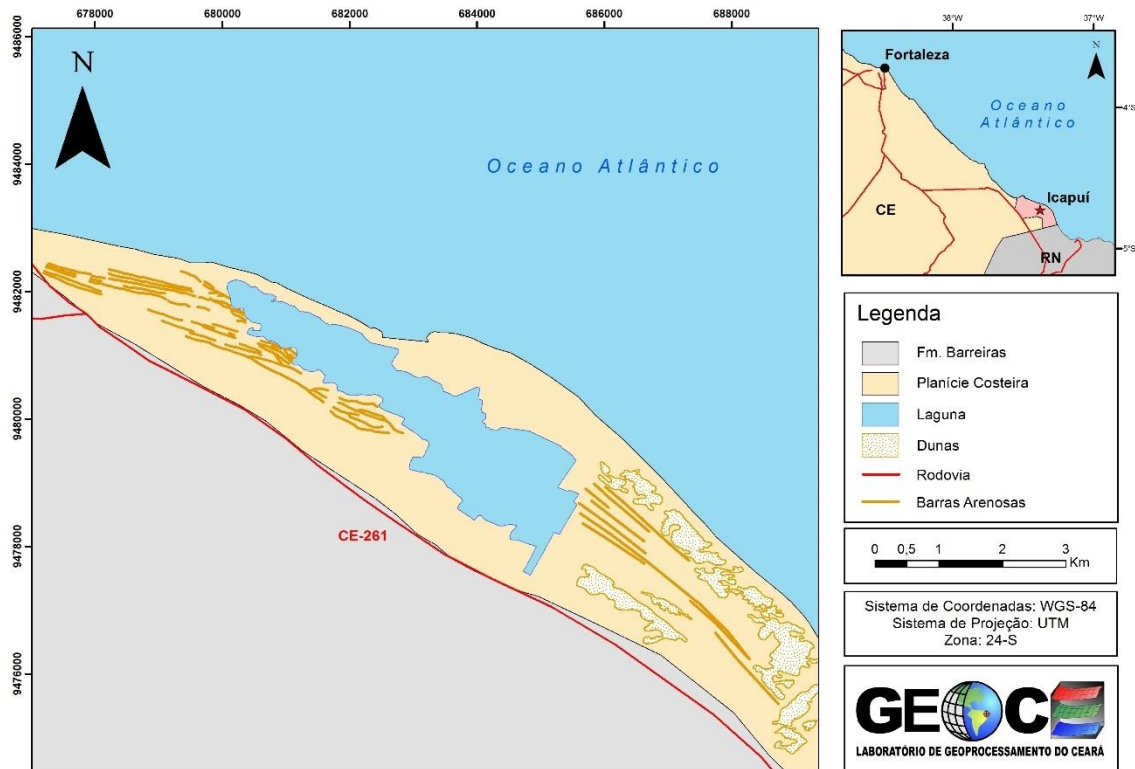


Figura 1.1: Mapa de localização da área de estudo que engloba o município de Icapuí/CE. Fonte: o autor.

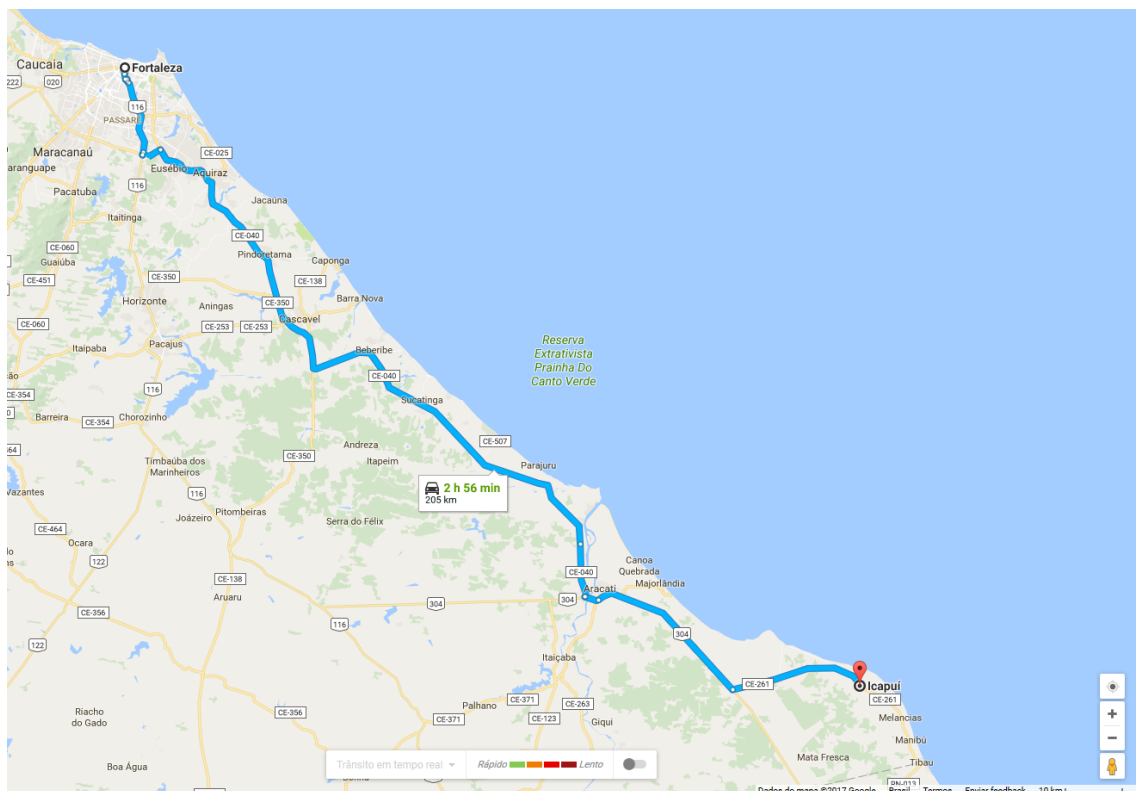


Figura 1.2: Mapa de acesso da área de estudo, partindo da cidade de Fortaleza até a cidade de Icapuí/CE. Fonte: Google Maps (2017).

1.3 MOTIVAÇÃO

A principal motivação deste projeto de pesquisa foi a compreensão dos aspectos que condicionaram a evolução quaternária do ambiente de planície costeira na região de Icapuí, e conseqüentemente a geração das sequências de cordões litorâneos existentes na região. Sendo um local de alta instabilidade morfológica, devido aos aspectos hidrodinâmicos, eólicos e tectônicos, está suscetível aos processos erosivos e deposicionais recentes, que pode provavelmente sofrer também com o efeito das reativações neotectônicas já estudadas por Rios (2015) no litoral potiguar, e dando seguimento aos estudos de Caldas (1998), Bezerra (1998), Bezerra *et al.* (2000; 2003) e Souto (2009) no litoral potiguar e nordestino.

1.4 OBJETIVOS

O principal objetivo da presente dissertação de mestrado foi a compreensão dos fenômenos associados à dinâmica costeira da região de Icapuí/CE, que culminaram na formação dos sistemas de cordões litorâneos da região, onde, para este fim, foi necessário estabelecer os seguintes objetivos específicos:

- Realizar técnicas de geoprocessamento em imagens de sensoriamento remoto da área de estudo, possibilitando a ampliação da percepção sensorial para a região, tanto pela visão panorâmica do espaço como pela ampliação da visão no espectro do infravermelho;
- A partir dos PDI's gerados, interpretar possíveis feições estruturais superficiais e ambientes geológicos pretéritos, além de individualizar os compartimentos geomorfológicos presentes na região de estudo;
- Descrever os testemunhos de sondagem obtidos usando critérios de descrição de fácies com a finalidade de individualizar ou correlacionar lateralmente os pacotes de sedimentos que ali se depositaram ao longo do quaternário superior;
- Submeter as fácies descritas a ensaios de peneiramento (análise granulométrica), permitindo a obtenção de informações no que diz respeito ao transporte e a proveniência do sedimento obtido, além de complementar a descrição de fácies realizada;
- Submeter os dados do ensaio granulométrico à análise estatística, a fim de testar se existe alguma relação estatística passível de interpretação entre as distribuições granulométricas;

- Confrontar os dados de sensoriamento remoto, sondagem, granulometria e estatística, possibilitando estabelecer uma discussão técnica, embasada em dados, que tornam a compreensão do ambiente mais criteriosa, permitindo a realização do objetivo principal citado anteriormente.

Assim, torna-se possível realizar uma melhor avaliação acerca da evolução geológica mais recente da área estudada e desenvolver um modelo de deposição para os pacotes sedimentares quaternários presentes na região, ajudando na compreensão dos ambientes que ali existiam.

Por seu caráter pioneiro, no que se refere aos estudos da evolução sedimentar do ambiente costeiro de Icapuí, este trabalho deve ser sucedido por outros que o complementem e que o tornem mais relevante. Possivelmente, o uso de técnicas de datação usando Carbono 14 e o uso da geofísica venham a adicionar novos dados para corroborar, ou não, as hipóteses aqui levantadas através dos dados obtidos.

1.5 CONTEXTO GEODINÂMICO

Neste item do primeiro capítulo serão analisados, de modo geral, os elementos geológicos e geomorfológicos dominantes que compõem o enfoque desta pesquisa. No item seguinte deste mesmo capítulo, serão descritos os aspectos referentes aos cordões litorâneos.

Para entender a Geologia e a Geomorfologia do litoral de Icapuí é preciso compreender um pouco do contexto tectono-estratigráfico da Bacia Potiguar da qual faz parte, que teve sua evolução tectônica iniciada pelos esforços extensionais durante o Cretáceo Inferior (Neocominiano), com conseqüente rifteamento que culminou com a separação das placas sul-americana e africana. Diante disso, é importante salientar que a Bacia Potiguar representa um conjunto de diferentes litotipos e estruturas que vêm sendo modeladas e retrabalhadas pelo mar, representando uma fonte substancial de sedimentos para a construção da planície costeira de Icapuí (MEIRELES, 1991).

Sendo uma das bacias sedimentares marginais que fazem parte do Sistema de Riftes Cretáceos do Nordeste Brasileiro, a Bacia Potiguar localiza-se em sua maior parte no estado do Rio Grande do Norte e em menor no estado do Ceará. De acordo com Bertani, Costa e Matos (1990), a bacia possui uma área de aproximadamente 48.000 km², sendo em torno de 21.500 km² pertencentes as áreas emersas e o restante pertencente a

plataforma e ao talude continental até a isóbata de 2.000 m (Figura 1.3). Geologicamente é limitada a sul, sudeste e sudoeste pelo embasamento cristalino da Província Borborema, estendendo-se a bacia para norte até a isóbata de 2.000 m. O alto de Fortaleza define seu limite oeste com a Bacia do Ceará (sub-Bacia de Mundaú), enquanto o alto de Touros define seu limite leste com a Bacia Pernambuco-Paraíba (BIZZI, 2008).

O arcabouço geológico da região é composto por unidades litológicas do Paleógeno-Neógeno ao Quaternário, dispostas estratigraficamente da base para o topo em: Formação Tibau, Formação Barreiras, Formação Potengi e Depósitos do Holoceno: Depósitos Eólicos Vegetados, Depósitos Eólico e de Praia, Depósitos de Intermaré e Depósitos de Supramaré (RIOS e AMARO, 2012).

A Formação Tibau (Paleógeno-Neógeno) é caracterizada por arenitos calcíferos grossos, derivados dos sistemas de leques costeiros e do preenchimento de vales incisos, e podem estar interdigitados lateralmente com a Formação Guamaré e Barreiras (SILVA, 1966 e PESSOA NETO *et. al*, 2007). Ocorre sobreposta aos basaltos e diabásios que compõem o Magmatismo Macau, que se apresentam localmente intrudidos e/ou intercalados às rochas da formação (FARIAS, 1997).

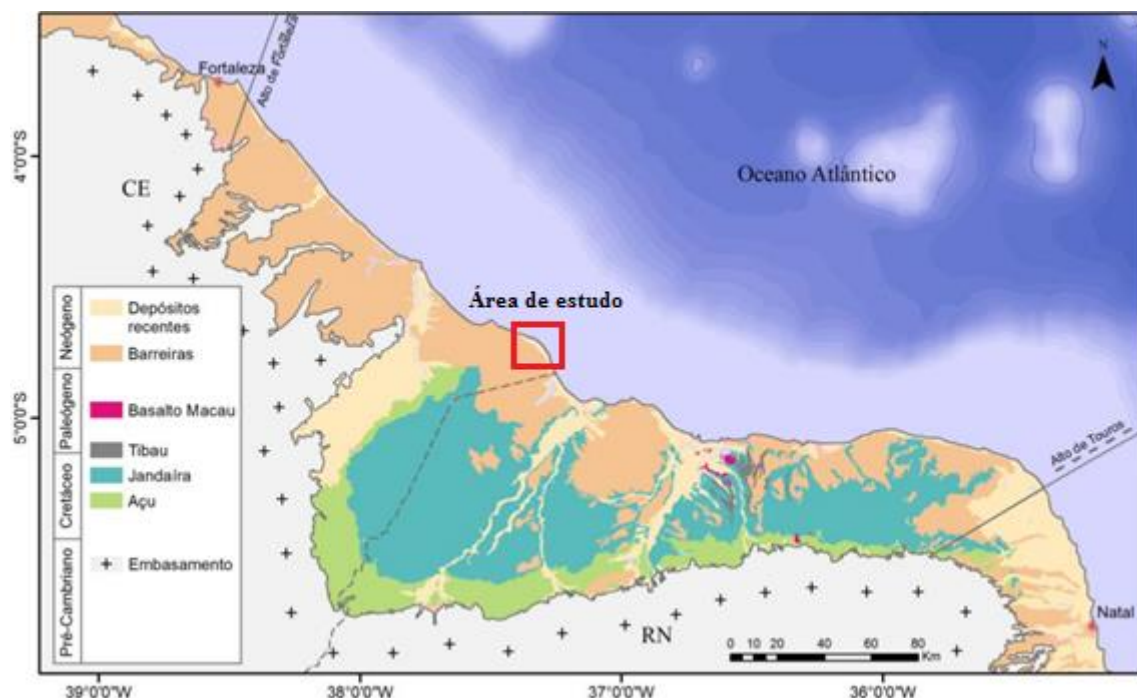


Figura 1.3: Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar. Adaptado de Angelim, Medeiros e Nesi (2006).

A Formação Barreiras (Paleógeno-Neógeno ao Quaternário) recobre rochas ígneas e metamórficas pré-cambrianas e rochas sedimentares cretáceas do Grupo Apodi.

Estudos em diferentes regiões do Brasil sugeriram que os sedimentos da Formação Barreiras foram depositados em um sistema fluvial entrelaçado, associado a leques aluviais (MORAIS *et. al*, 2006), com influência de marés na porção mais distal do sistema (ARAI, 2006; ROSSETTI, 2006) ou ainda fluvial meandrante a estuarino (ARAÚJO *et al.*, 2006).

A idade das rochas da Formação Barreiras ainda é motivo de debate, embora sua correlação com o Grupo Agulha seja a mais aceita. Lima (2008) atribuiu idades que variam entre 17 e 22 Ma para as rochas da Formação Barreiras, utilizando a datação de óxidos de manganês e óxidos/hidróxidos de ferro supergênicos por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ e (U,Th)/He, respectivamente, o que permitiu determinar a idade de precipitação destes minerais. Arai (2006) encontrou resultados semelhantes através da datação do conteúdo microfossilífero da Formação Barreiras, em seu estudo sobre a origem desta formação.

A Formação Potengi (Quaternário) é constituída por sedimentos que ocorrem estratigraficamente acima da Formação Barreiras e abaixo das dunas recentes (CAMPOS SILVA, 1983). É caracterizada por sedimentos quartzosos com pouca argila e com grânulos de limonita, de coloração avermelhada, e mais escura em direção ao litoral (VILAÇA *et al.*, 1985). De modo geral, as coberturas sedimentares holocênicas da área de estudo são simplificadas em mapas como “Coberturas Quaternárias”, sendo constituída predominantemente por sedimentos provenientes dos processos deposicionais relacionados ao Holoceno, como leques aluviais, sedimentos de praia, dunas móveis, aluviões, manguezais e coberturas arenosas (aluvial, eólico e marinho) que recobrem as unidades mais antigas ao longo da costa (SILVA e NOGUEIRA, 1995; FARIAS, 1997; STATTEGGER; CALDAS; VITAL, 2006).

Arcabouço Estrutural

Bertani, Costa e Matos (1990) simplificaram o arcabouço estrutural da Bacia Potiguar em três feições morfoestruturais principais (Figura 1.4):

- Grabens: na parte terrestre, estão representados pelos Grabens de Apodi, Umbuzeiro, Guamaré e Boa Vista, exibindo feições lineares de direção NE-SW, forma assimétrica, limitados a sudeste e sudoeste por falhas que ultrapassam 5.000 m de rejeito. Os grabens da parte submersa também são assimétricos e orientados aproximadamente paralelos à atual linha de costa. Os grabens estão preenchidos por sequências sedimentares do Cretáceo Inferior.

- *Altos internos*: correspondem às cristas alongadas do embasamento separando os principais grábens. São compostos por blocos de gnaisses, migmatitos ou xistos soerguidos por falhas normais. Os principais altos internos são os Altos de Quixaba, Serra do Carmo e Macau, subparalelos aos eixos dos grabens adjacentes. As seqüências do Cretáceo Inferior estão ausentes sobre os altos internos devido à erosão ou não-deposição.
- *Plataformas rasas*: As plataformas rasas do embasamento de Touros e Aracati flanqueiam os grabens centrais a este e oeste. Essas plataformas são normalmente recobertas por sedimentos do Aptiano e Cretáceo Superior na parte terrestre e também por seqüências paleógenas-neógenas na parte marítima.

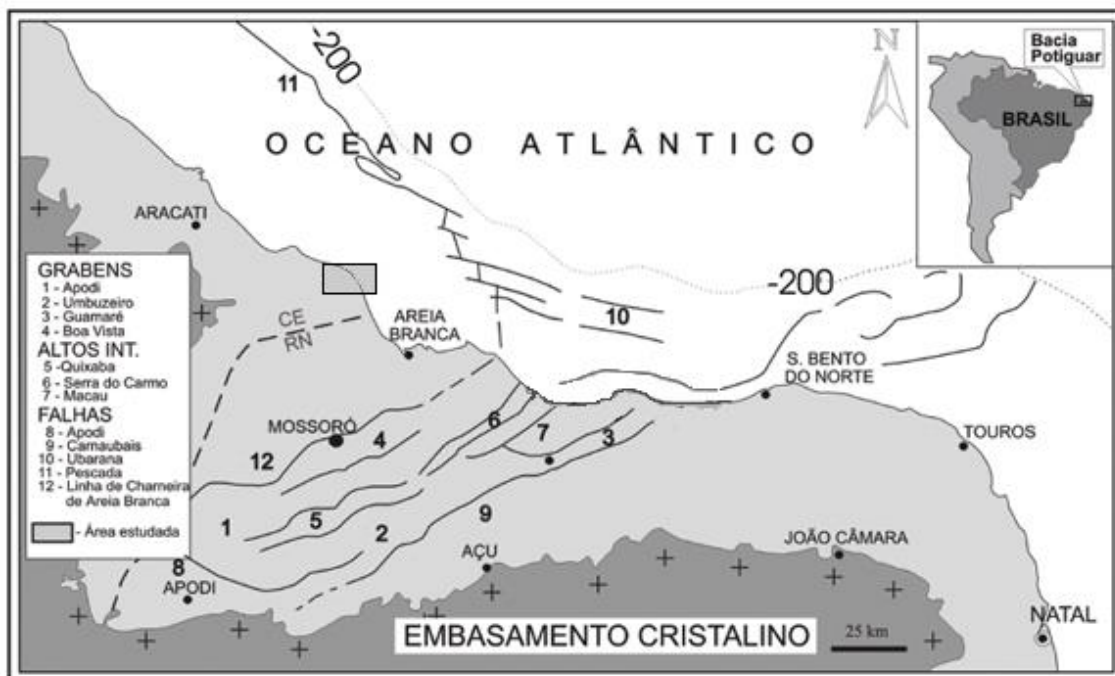


Figura 1.4: Mapa estrutural da porção emersa da Bacia Potiguar. Compilado de Bertani *et al.* (1990).

1.6 CORDÕES LITORÂNEOS

Pela definição proposta por Davis Jr. e Fitzgerald (2004), cordões litorâneos são acumulações de sedimentos em regiões costeiras, que são formadas por sobreposição de sedimentos e que podem ter origem eólica e/ou marinha. A maioria são predominantemente lineares, tendendo a apresentar-se paralelamente à costa, ocorrendo geralmente em grupos ou cadeias, podendo estar separadas do continente por uma região denominada retrobarreira, que pode ser composta por planícies de maré, baías ou lagunas

(Figura 1.5). São tidos como um dos elementos deposicionais mais importantes dentro do contexto das feições geomorfológicas da zona costeira (DILLENBURG e HESP, 2008).

Estas estruturas ocorrem em todo o mundo, principalmente em regiões de margem passiva, onde a topografia costeira geralmente é mais suave e onde o aporte sedimentar tende a ser mais abundante (DILLENBURG e HESP, 2008). Em todo o mundo, os cordões litorâneos são facilmente reconhecidos e recebem muitos outros nomes e termos (OTVOS, 2012).

A geologia dos sistemas de cordões litorâneos tem um grau de complexidade elevado devido à diversidade de ambientes costeiros de formação dessas estruturas. Podem ser observados, por exemplo, sistemas que possuem uma continuidade lateral de dezenas de quilômetros, ao passo que, em outros locais, esta continuidade é de poucos quilômetros. A complexidade pode aumentar devido a fatores como a mudança do nível do mar, regime de transporte/deposição do aporte sedimentar local e das regiões adjacentes, como também devido a influência relativa dos processos relacionados aos regimes de onda e de maré (DAVIS JR., 2012).

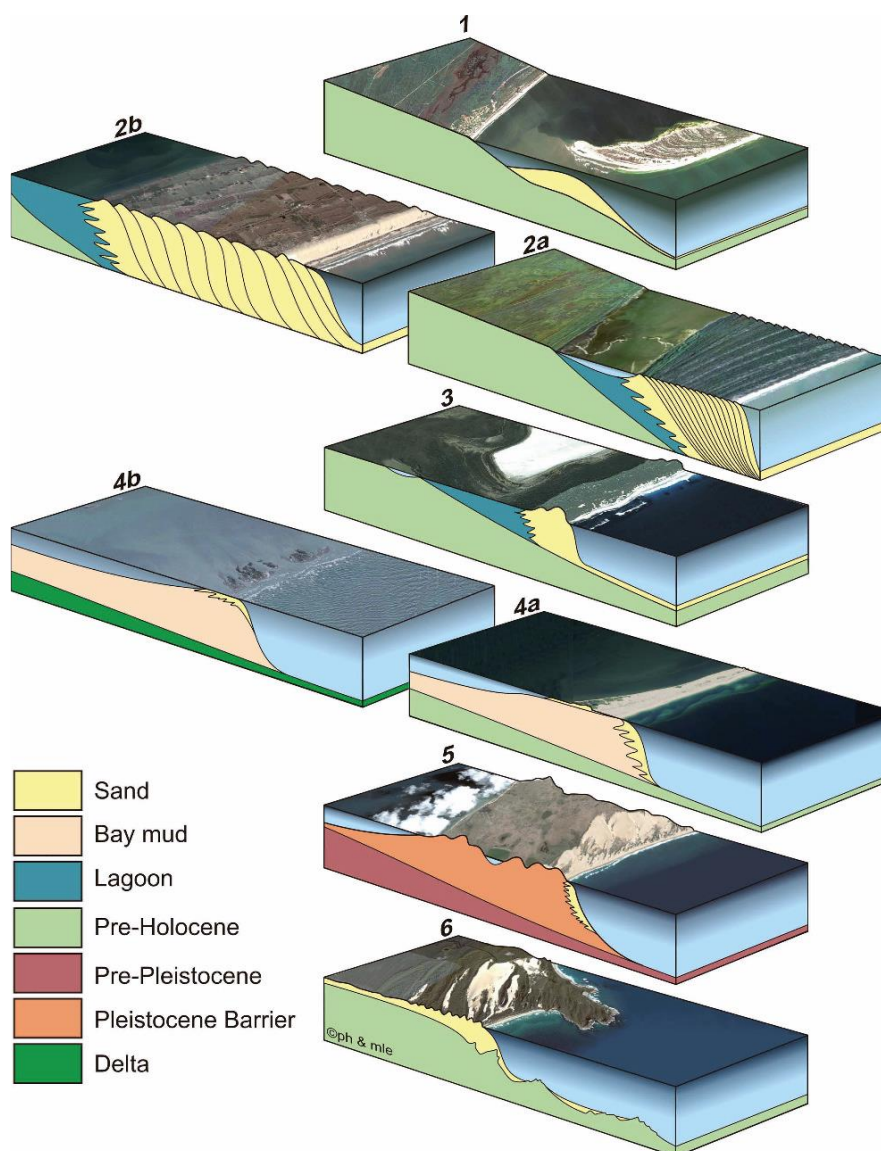


Figura 1.5: Modelos simplificados de alguns dos principais tipos de cordões litorâneos. (1) Barreira tipo *spit* progradante (o continente também pode ter uma barreira ligada a formas de relevo mais velhos ou separadas por uma lagoa); (2) Barreiras progradantes com planície de dunas frontais ou planície de *beach ridges* (a) ou várias fases de campos de dunas transgressivas (b); (3) Barreira Agradacional; (4) Barreira retrogradacional ou ilha barreira (a e b); (5) Barreira retrogradacional; (6) barreira anexada compreendendo fases de dunas parabólicas também formando um campo de dunas. Compilado de Dillenburg e Hesp (2008).

Apesar da quantidade de definições apresentadas por diversos autores nas últimas décadas, fato que é discutido em Otvos (2000 e 2012), há um consenso de que um cordão litorâneo é uma estrutura paralela à costa, formada por uma acumulação de areia, cascalho, conchas, e/ou pequenas quantidades de matéria orgânica, devido à ação das ondas, marés e ventos. Há uma grande variedade de tipos de cordões litorâneos, variando de ilhas estreitas afastadas da costa e do continente para aquelas associadas a afloramentos rochosos litorâneos. Cordões litorâneos podem ser evidenciados pela associação a lagunas, baías ou planícies alagadas, como também pela idade, litologia e forma dos

depósitos. No entanto, alguns autores, como Bird (2005), ainda defendem a ideia de que as barreiras devem necessariamente estar associadas a uma laguna ou mangue.

Segundo Peulvast e Claudino-Sales (2006), cordões litorâneos se desenvolvem nos setores em que há a maior abundância de sedimentos em relação às demais áreas e em regiões onde a profundidade da plataforma interna é suave, o que permitiria a acumulação desses depósitos. Sua classificação envolve diversos parâmetros, como por exemplo os baseados na altura de ondas e amplitude de marés (ambientes dominados por ondas, marés ou de energia mista), na dinâmica preponderante (dinâmica das correntes de deriva litorânea, das ondas, dos fluxos fluviais, das marés ou da conjugação delas) e também na sua conexão com o continente (se ancoradas em inflexões na linha de costa pela porção proximal, na porção proximal e distal, ou totalmente desconectadas do continente).

Em um sistema inicialmente concebido por Davis e Hayes (1984) e aprimorado por diversos autores, os ambientes deposicionais costeiros são divididos, com base na altura da onda e na amplitude de maré, em três tipos principais, que são: ambientes dominados por ondas, de energia mista e dominados por maré, sendo os cordões litorâneos encontradas quase que exclusivamente nos ambientes de energia dominada por ondas e de energia mista (Figura 1.6). É importante salientar que não é o valor absoluto da altura da onda ou da amplitude de maré que importa, e sim a proporção dos dois parâmetros, que determinam a presença e a distribuição de barreiras (DAVIS JR. e FITZGERALD, 2004).

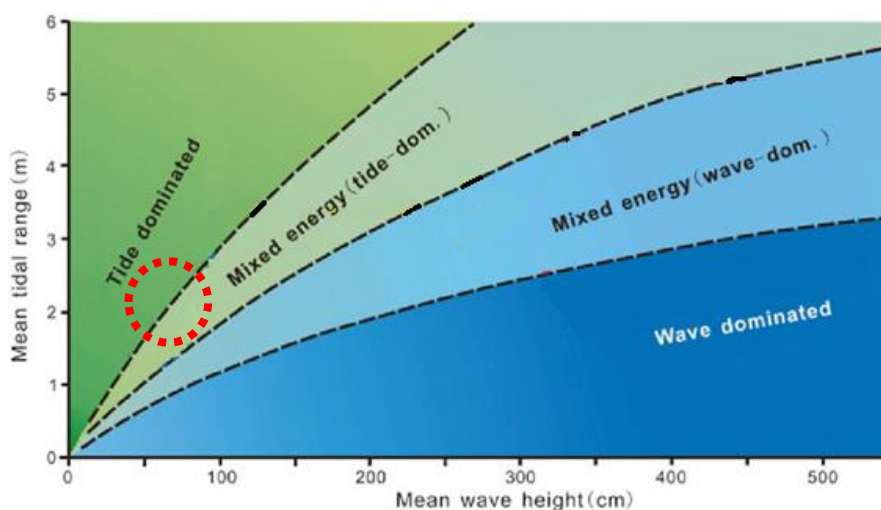


Figura 1.6: Subdivisão dos ambientes deposicionais costeiros em ambientes dominados por marés (*Tide-Dominated Coasts*), ambientes dominados por ondas (*Wave-Dominated Coasts*) e ambientes de energia mista (*Mixed-Energy Coasts*) com base na altura média das ondas e da amplitude média das marés. A área em destaque apresenta uma média destes valores para a costa de Icapuí. Adaptado de Daidu (2012).

De acordo com cada ambiente costeiro e suas características intrínsecas, a formação de cordões litorâneos pode ocorrer de maneiras diferentes por conta dos processos predominantes em cada um deles. Na zona costeira do Ceará, os processos que atuam predominantemente na formação de cordões litorâneos são as ondas, a corrente longitudinal, o fluxo dos rios e as marés (MIRANDA, 2017). Logo, para essa região, do ponto de vista da dinâmica atuante, os cordões litorâneos podem ser classificados em três tipos (Figura 1.7 a 1.9):

- *Barreira spit (Barrier Spit)*: ocorre em litorais cujo aporte de sedimentos é transportado predominantemente pela corrente longitudinal e por ondas (DAVIS JR., 2012; HESP; MAIA; CLAUDINO-SALES, 2009; OTVOS, 2012);

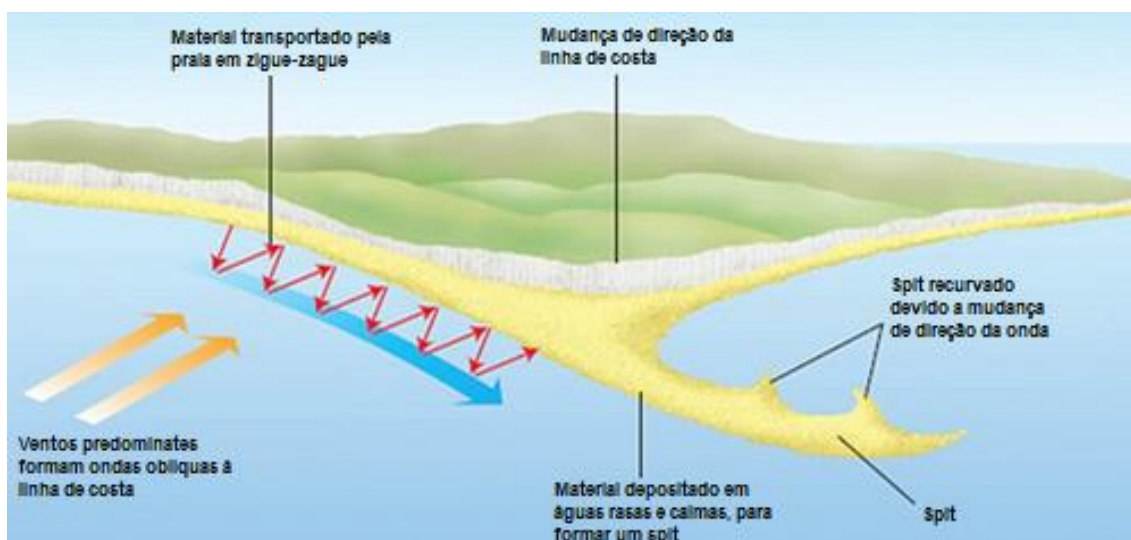


Figura 1.7: Processo gerador das barreiras do tipo *spit*. As ondas atingem a linha de costa seguindo a direção preferencial dos ventos, promovendo o transporte lateral de sedimentos no sentido da corrente de deriva litorânea. Ao encontrar locais mais rasos, o sedimento transportado se deposita, favorecendo o crescimento do *spit*, que pode apresentar-se recurvado tanto por uma mudança na direção de propagação das ondas, como também por influência de marés. Extraído de <https://projectwatershed.ca/wp-content/uploads/2017/06/Spit-formation.jpg>

- *Spits duplos (Double Spits)*: formados em litorais onde a energia e sedimentos dos fluxos fluviais participa da modelagem de depósitos litorâneos juntamente com as ondas (DAVIS JR., 2012; HESP; MAIA; CLAUDINO-SALES, 2009);

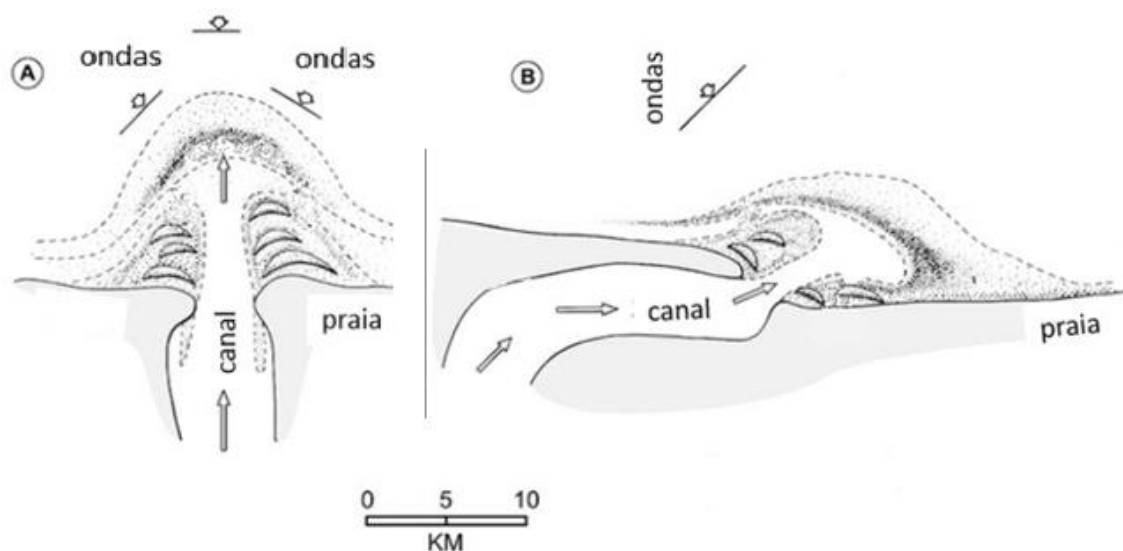


Figura 1.8: Formação de *spits* duplos na foz de um rio sob influência de ondas de incidência normal (A) e oblíqua (B). Extraído de Miranda (2017)

- *Barreiras de energia mista (Mixed-Energy Barriers)*: formadas em litorais nos quais a dinâmica estaria controlada pela ação combinada das ondas e das marés. (DAVIS JR., 2012; HESP; MAIA; CLAUDINO-SALES, 2009). São exemplos as ilhas-barreiras e os *spits* recurvados (*Drumstick Barriers*)



Figura 1.9: As barreiras do tipo “drumstick” estão associadas a ambientes de energia mista, apresentando um alargamento com encurvamento em direção ao continente na porção mais distal do *spit*, que podem ocorrer devido à influência das marés. Acima, uma ortofoto interpretada (1994) da ilha Bull Island, no estado da Carolina do Sul, no sudeste dos EUA. Extraído de <http://oceanica.cofc.edu/an%20educator%27s%20guide%20to%20folly%20beach/guide/bullisland.htm>

Os cordões litorâneos do tipo *spit* formam-se em ambientes cujos sedimentos são trabalhados pelas ondas e pela corrente longitudinal. Em relação à morfologia do litoral, são comuns a sotamar de pontas litorâneas e onde ocorrem inflexões da linha de costa. No primeiro caso, as pontas produzem armadilhamento de areias e difração de ondas, fatores que propiciam a acumulação de sedimentos. No segundo caso, as inflexões produzem acentuado ângulo de incidência das ondas, o que leva a uma maior ação da corrente longitudinal e da deriva litorânea (PEULVAST; CLAUDINO-SALES, 2006).

Os *spits* duplos ocorrem em desembocaduras de rios, regiões onde as ondas, a corrente longitudinal e o escoamento fluvial são os processos predominantes. Nesse caso, surgem dois *spits*, um em cada margem do rio ou canal. Conforme Peulvast e Claudino-Sales (2006), nas desembocaduras de rios cearenses, durante o período de seca, a ação das ondas é maior que a do fluxo fluvial, o que permite a deposição de sedimentos na foz e a consequente dispersão dos mesmos pela corrente longitudinal.

As barreiras de energia mista são formadas pela ação combinada das ondas, da corrente longitudinal e das marés. Essas barreiras geralmente constituem um complexo de corpos sedimentares com uma morfologia arqueada em direção ao mar, podendo ter semelhança com a forma de uma “coxa de frango” (*drumstick barriers*). No caso de formar ilhas-barreiras, os *inlets* apresentam-se mais desenvolvidos devido a energia de maré relativamente maior. Também podem ocorrer deltas de maré vazante devido à força das correntes de maré, que é capaz de transportar sedimentos para o mar em períodos de energia de onda relativamente baixa.

Embora cordões litorâneos tenham muitas formas diferentes, para facilitar a discussão eles foram agrupados por Davis Jr. e Fitzgerald (2004) em três classes principais (Figura 1.10), com base na sua conexão com o continente:

- Barreiras *spits* (*barrier spits*): são anexados ao continente por uma extremidade, sendo a extremidade oposta encerrada em uma baía ou no oceano aberto.
- *Spits* soldados (*welded spits*): são ligadas ao continente nas duas extremidades, podendo, ocasionalmente, ser entrecortadas por canais de maré, dando origem a um sistema de *spits* duplos.
- Ilhas barreiras (*barrier islands*): são isoladas do continente e cercadas por água, podendo ser originadas a partir dos dois tipos anteriores.

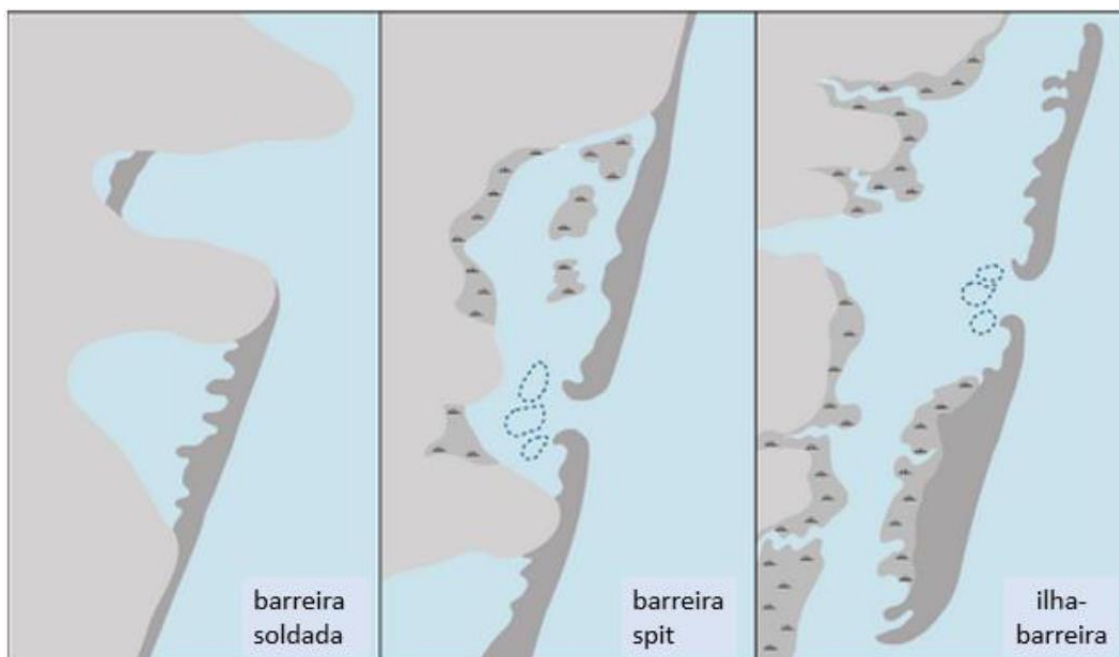


Figura 1.10: Os três tipos morfológicos de barreiras arenosas com base em sua conexão com o continente. Extraído de Davis Jr. e Fitzgerald (2004).

A morfologia do litoral cearense também possui um papel importante na formação dessas estruturas, pois elas são normalmente encontradas em segmentos costeiros diferenciados (promontórios, enseadas, arcos litorâneos e no entorno de desembocaduras fluviais), onde o aprisionamento de sedimentos parece ser favorecido pela fisiografia antecedente. As barreiras estão distribuídas nos setores leste (tipo *spit* e *spit* duplo), central (*spit* duplo) e oeste (barreira *spit*), sendo alguns associados a rios e canais de maré de pequeno porte. Os principais processos envolvidos na erosão, transporte e deposição de sedimentos associados a barreiras são: ondas, correntes longitudinais, marés e o fluxo dos rios (MIRANDA, 2017).

1.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ESTUDOS DE AMBIENTES QUATERNÁRIOS

Os depósitos sedimentares guardam informações das condições ambientais da sua época de formação e são fundamentais na análise geomorfológica de ambientes quaternários, o que corrobora para o estabelecimento de correlações e elucidções sobre os processos envolvidos nos episódios climáticos recentes e o seu respectivo posicionamento geocronológico. Todavia, o princípio de correlação esbarra, também, em certas dificuldades, como por exemplo, a ausência de material fossilífero, o que dificulta o estabelecimento de uma cronologia entre as superfícies e os depósitos estudados. Estes problemas de correlação na escala espaço-temporal dos processos responsáveis pelo

desenvolvimento das feições de relevo mais recentes contribuíram para o desenvolvimento de uma geomorfologia do Quaternário, com métodos geocronológicos capazes de desmistificar os questionamentos acerca dos postulados defendidos pelos que acreditaram numa história evolutiva generalista. Contudo, é reconhecido que tais modelos clássicos foram fundamentais para que um novo contexto da ciência geomorfológica fosse desenvolvido, intensificando a busca por depósitos correlativos datáveis nos estudos do Período Quaternário a partir da década de 1980 (LIMA, 2015).

Nas últimas décadas, destacam-se os enfoques direcionados ao Período Quaternário por constituir dentro da escala geológica, o momento mais recente da história da Terra e da disseminação da espécie humana, cuja reconstrução ambiental é, em relação aos outros períodos, favorecida pela existência de quase todas as plantas e parte de animais que vivem desde o início do Quaternário (SALGADO-LABOURIAU, 1994).

A amplitude temporal e processual abarcada por esse intervalo de tempo possibilita o desenvolvimento de inúmeras pesquisas que tenham como foco, em especial, a compreensão da dinâmica dos processos responsáveis pelo arranjo das diferentes formas da paisagem. Pois, sabe-se que a maior parte das paisagens dos continentes atuais é de origem geológica relativamente recente e os processos que as modificaram continuam atuando (SALGADO-LABOURIAU, 2007), e que as marcas deixadas na superfície ainda não foram totalmente destruídas pela erosão e/ou intemperismo, condição que possibilita uma reconstrução aproximada dos processos formadores do Quaternário tardio, ou seja, do final do Pleistoceno e Holoceno (LIMA, 2015).

Abrangendo os últimos 2,6 milhões de anos (equivalente a menos de 1% do tempo geológico) encontra-se, conforme as peculiaridades ambientais, subdividido em duas épocas temporalmente desiguais: o Pleistoceno, que envolve a maior parte do Quaternário e sucede o Plioceno, com limite demarcado pela primeira grande glaciação de caráter global; e o Holoceno, extremamente breve quando comparado ao Pleistoceno, que corresponde aos últimos 11.700 anos até o presente (SUGUIO, 2005; INQUA, 2014). Sendo um período predominantemente frio, de acentuada mudança climática e de intensas modificações na paisagem, o Quaternário ficou conhecido como a "Idade do Gelo". Mesmo ainda sendo muito discutido o limite Pleistoceno/Holoceno, Salgado-Labouriau (1994; 2007) optou pela proposição dos 10.000 anos, haja vista que foi determinada por dados de radiocarbono e por seguir recomendação da União Internacional para o Estudo do Quaternário. Assim, o cenário conhecido para o final do Pleistoceno e de todo o

Holoceno é alvo da proposição de modelos que deem suporte às interpretações paleoclimáticas e ambientais dos ciclos glaciais, especialmente os mais antigos por serem, até o momento, pouco conhecidos (SALGADO-LABORIAU, 2007).

No final da última glaciação, observou-se um período de máxima expansão das geleiras na Europa e América do Norte, que ficou conhecido como o Último Máximo Glacial – UMG (próximo dos 21.000 anos AP). Convém destacar que as mudanças no quadro climático não foram sentidas uniformemente ao longo da superfície da Terra, nem tampouco com ciclos estáveis livres de oscilações. As características gerais de um ciclo são mais fáceis de serem reconhecidas do que os padrões de oscilações, pois essas podem ser ora efêmeras ora demoradas, ora de alta magnitude ora de baixa intensidade, cujos *feedbacks* na paisagem são tão importantes quanto os de um ciclo completo. A transição Pleistoceno/Holoceno e todo o Holoceno testemunham bem o curso dessas flutuações ao longo de um ciclo e o reconhecimento na paisagem dos fatores causadores e as possíveis consequências são o desafio das pesquisas atuais (LIMA, 2015).

Essas múltiplas oscilações marcam claramente o final do Último Glacial pleistocênico e o desdobramento do Holoceno, sobretudo no último milênio. Com base nas inúmeras pesquisas desenvolvidas tem-se um cenário aproximado, contudo generalizado, dessas oscilações, a saber: entre 20.000 e 14.000 anos AP., início do retrocesso das geleiras em direção aos polos com lento aquecimento de todo o planeta; por volta de 10.000 anos AP., início do atual interglacial; de 8.000 a 7.000 anos AP., chuvas torrenciais e umedecimento dos climas continentais, sobretudo na América do Norte, enquanto na zona intertropical, condições de secura e ventos fortes ainda dominavam a paisagem; de 7.600 a 4.500 anos AP., iniciou um Ótimo Climático, momento mais quente do atual interglacial em cerca de 2-3°; de 4.500 a 4.000 anos AP., os dados sugerem uma queda brusca da temperatura, o que marcou o início de uma das épocas mais fria do interglacial; entre 2.500 e 2.000 anos AP., foi a época mais fria do interglacial; entre 1.800 e 1.000 anos AP., houve o aumento da temperatura, caracterizando o que se convencionou chamar de segundo Ótimo climático; entre os séculos XVI e XIX, condições frias dominaram a paisagem, experimentando uma pequena época glacial – Pequena Idade do Gelo; a partir de 1850, ocorreu um retorno às condições mais quentes que se prolongam até os dias atuais, com recuo do gelo para os polos e para maiores altitudes (SANT'ANNA NETO e NERY, 2005; SALGADO-LABOURIAU, 2007).

2 METODOLOGIA APLICADA

2.1 INTRODUÇÃO

Para tornar possível os objetivos propostos, foi desenvolvida uma metodologia abrangente, na qual foram associados dados de amostragem com vibrotestemunhador, dados de Sensoriamento Remoto e dados de análise granulométrica. Assim, a estrutura primária do trabalho pôde ser dividida em quatro etapas:

- **Etapa de gabinete:** Nesta etapa, foi realizado um minucioso levantamento bibliográfico e cartográfico da área em questão, de onde posteriormente foram coletadas e analisadas imagens de satélite para delimitação da área de estudo e definição dos pontos aparentemente mais interessantes para coleta de amostras.
- **Etapa de campo:** Nesta etapa foi possível realizar a confirmação dos pontos de coleta de sedimentos para então aplicar as técnicas de vibrotestemunhagem previamente determinadas. De forma conjunta, também foram obtidos nesta etapa os dados de geodésia de precisão em cada ponto de coleta, visando correlacionar de forma mais precisa os dados de cada testemunho.
- **Etapa de laboratório:** Nesta etapa foi realizada a abertura dos testemunhos de sondagem, o que possibilitou a análise e descrição das fácies dos sedimentos coletados. Posteriormente, também foram realizadas análises granulométricas das fácies observadas, e conseqüentemente o tratamento estatístico dos dados de granulometria. Além disso, também foram utilizadas algumas técnicas de processamento digital das imagens de sensoriamento remoto, visando destacar de forma mais assertiva as feições quaternárias regionais.
- **Etapa de análise e integração dos dados:** Baseado em todas as informações levantadas nas etapas anteriores, foi possível tecer algumas hipóteses sobre o antigo ambiente costeiro da área de estudo através da integração das informações obtidas na descrição de fácies, análise granulométrica e sensoriamento remoto.

Visando possibilitar uma melhor compreensão de toda a sequência de atividades aqui desenvolvidas, foi elaborado um fluxograma que explica de forma mais sucinta cada etapa deste trabalho (Figura 2.1):

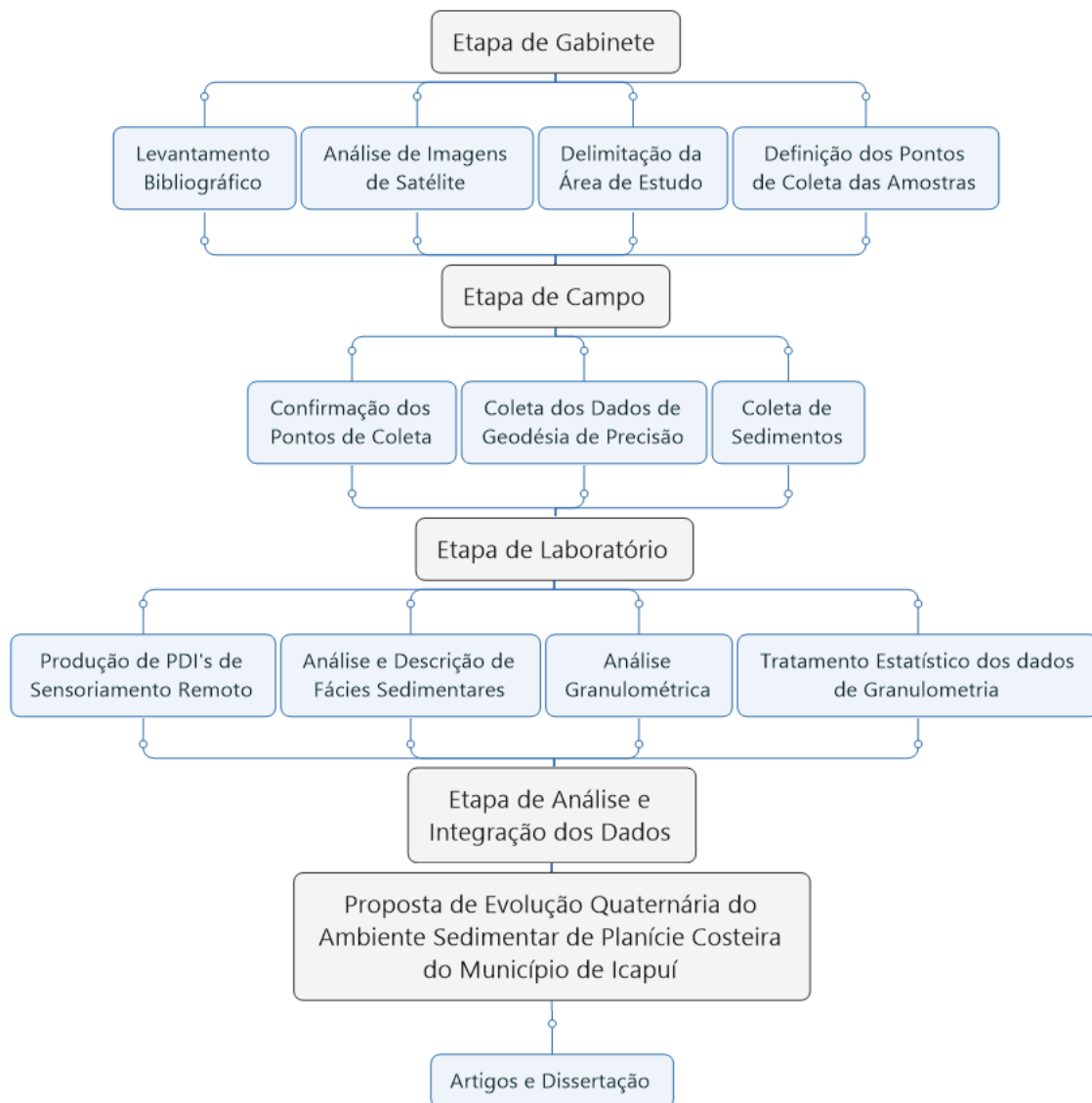


Figura 2.1: Fluxograma da metodologia aplicada na dissertação de mestrado. Fonte: o autor

2.2 MATERIAIS

Para a confecção desta dissertação de mestrado, foram utilizados diversos materiais, visando suprir a demanda de cada método aplicado. Assim, os materiais utilizados foram:

- Livros, artigos científicos, monografias, dissertações e teses dos mais variados autores, que foram usados com o objetivo de dar fundamentação teórica ao trabalho aqui apresentado;
- Imagens de Sensoriamento Remoto do orbital Sentinel-2, composto pelos satélites Sentinel-2A e Sentinel-2B, apresentando imagens multiespectrais (13 bandas)

com resolução espacial variando de 10 e 60 metros, com aquisição das imagens em 28/10/2016 às 12:53;

- Equipamentos do Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE/UFC), consistindo em um GPS de mão Garmin modelo Oregon 650; um receptor GNSS L1 modelo S750 da marca South acompanhado do kit para aquisição de dados (antena, bastão e tripé); quatro canos de PVC rosqueados nas duas pontas (40 mm de diâmetro, 5 mm de espessura e 2 m de comprimento); e três canos de alumínio (45 mm de diâmetro, 2 mm de espessura e 2 m de comprimento);
- Equipamentos cedidos pelo Laboratório de Geologia Marinha e Ambiental (LGMA/UFC), consistindo em um vibrotestemunhador, que é composto por um motor a gasolina 4T, que emite vibrações a 3500 rpm através de uma estrutura de vibração fixada ao cano por uma braçadeira; um tripé de ferro com um sistema de catracas e correntes; e um marteleto rompedor e bate-estaca da marca Kawashima com uma adaptação para encaixe de canos, além de uma maquina com disco circular usada para abrir os canos de PVC e alumínio;
- Equipamentos do Laboratório de Geotécnica (LAGETEC/UFC) para ensaios de classificação granulométrica, consistindo em uma balança analítica para 0,01 g de precisão; um kit de peneiras (1000 μm (0 Φ), 500 μm (1 Φ), 250 μm (2 Φ) 125 μm (3 Φ), 63 μm (4 Φ) e fundo); *rotap* para peneiramento mecânico a seco, estufa para secagem de material e vidrarias de laboratório e;
- *Softwares* de Geoprocessamento em ambiente SIG (ArcGIS[®] 10.3 e ENVI[®] 5.0), *software* de desenho Autocad[®] 2017 e *softwares* de edição de texto e planilhas do pacote Microsoft Office[®].

Seguindo a ordem de obtenção de materiais e geração de dados, em um primeiro momento os métodos utilizados são uma combinação de um planejamento de atividades e obtenção de referências bibliográficas e imagens de satélite da região de estudo seguidas pelo trabalho de campo e pelas atividades desenvolvidas nas dependências de diversos laboratórios, além da interpretação de dados gerados e dos fatores preponderantes que condicionaram a deposição do material sedimentar na região de Icapuí.

Portanto, para uma melhor explanação dos métodos usados na elaboração desta dissertação de mestrado, foi necessário dividi-la em etapas de trabalho distintas, que foram definidas em: Geoprocessamento e Processamento Digital de Imagens (PDI); vibrotestemunhagem; descrição e análise de fácies; análise granulométrica e análise e

interpretação de dados. Dispostas assim, de forma integrada, esta estruturação exhibe uma melhor organização dos resultados que serão apresentados.

2.3. MÉTODOS

2.3.1 Sensoriamento Remoto e PDI

Os avanços tecnológicos das últimas décadas contribuíram para facilidade e eficácia das investigações/pesquisas em diversas áreas do conhecimento, promovendo o desenvolvimento de diversas técnicas voltadas para investigação e estudos na região costeira, tanto para caracterização em superfície quanto em subsuperfície. Em alguns casos, métodos invasivos de investigação não podem ser realizados devido a questões ambientais e conservação ou mesmo devido à impossibilidade financeira e logística para aquisição de dados em grandes áreas. Assim, o sensoriamento remoto se destaca como uma ferramenta para aquisição de dados indiretos, possuindo as vantagens de ser um método não-invasivo, de rápida aquisição dos dados e com a possibilidade de análise de amplas áreas baseados no registro da energia eletromagnética refletida pelos alvos em superfície (ROCKETT, 2014).

No Sensoriamento Remoto orbital a energia proveniente da superfície terrestre é mensurada através de um sensor a bordo de um satélite. Esta energia medida é utilizada para gerar imagens da superfície, possibilitando a obtenção de dados sem a necessidade do contato físico entre o analista e o alvo existente na imagem (RICHARDS e JIA, 2006).

Todo o avanço tecnológico atrelado à aquisição de imagens orbitais por Sensoriamento Remoto não faria sentido se não ocorresse simultaneamente o desenvolvimento de técnicas de processamento das informações contidas nas imagens. A necessidade de processamento ocorre devido ao fato da imagem conter uma quantidade muito maior de informações do que a que o olho humano conseguiria perceber. É necessário, portanto, torná-la mais visível, ou representá-la de uma forma pela qual ela possa ser percebida. Justamente aí se coloca o papel fundamental do PDI, no sentido de traduzir essa informação para o intérprete, extraíndo dela apenas a parte essencial aos fins determinados. Como produto final, podemos ter composições coloridas (ou falsa-cor) e técnicas mais elaboradas como transformações RGB-IHS, razões de bandas e outras técnicas.

Várias técnicas são usadas para estudar e mapear áreas costeiras, usando dados de diversas origens, e variando de simples estudos como a análise visual, até as mais complexas, como a análise multiespectral. O termo composição RGB, composição colorida ou falsa-cor, consiste da combinação de 3 bandas espectrais captadas pelos sensores dos satélites dispostas em três canais de cores (*Red-Green-Blue*) para a formação de uma imagem colorida. Esta combinação de bandas consiste de uma seleção cuidadosa, observando se esta seleção contenha as informações espectrais realmente desejadas. É importante também salientar a necessidade de se selecionar a alocação de cores que tenham uma melhor percepção ao olho humano, embora as informações contidas numa imagem sejam sempre as mesmas, não importando a combinação de bandas e alocação de cores (SOARES *et al.*, 1992).

A transformação RGB-IHS consiste em um procedimento de filtragem onde, segundo Centeno (2004), a imagem composta por três bandas é transformada do espaço RGB ao sistema IHS. Neste último, as cores são representadas através de três componentes: intensidade (*Intensity - I*), matiz (*Hue - H*) e saturação (*Saturation - S*). A componente intensidade (I) é a medida do brilho de uma determinada cor, a matiz é o comprimento de onda dominante da cor observada e a saturação é o grau de pureza da cor (PINHO *et. al*, 2005). Neste estudo, os produtos RGB apresentados foram transformados para um único produto composto de três canais com valores no sistema IHS.

Quando se seleciona a melhor combinação de canais e filtros para uma composição colorida, tem-se que conhecer o comportamento espectral do alvo de interesse. Sem o conhecimento, corre-se o risco de desprezar faixas espectrais de grande significância na sua discriminação. E para que se possam extrair informações a partir de dados de Sensoriamento Remoto, se faz necessário o conhecimento do comportamento espectral dos objetos da superfície terrestre e dos fatores que interferem nesse comportamento (NOVO, 1992).

Operações matemáticas simples são bastante utilizadas em Geoprocessamento, na análise de imagens multiespectrais. A operação é realizada *pixel a pixel*, resultando em uma banda que corresponde à combinação das bandas originais (FONSECA, 2000). A matemática de bandas é muito usada para realçar feições de interesse, sendo recomendada para, dentre outros objetivos, a análise de feições costeiras, pois realça o contraste entre os diferentes materiais na imagem, com as bandas utilizadas devendo ser selecionadas de

forma a cobrir máximos e mínimos de absorção dos materiais de interesse (ZACCHI, 2010).

Uma das técnicas de matemática de bandas, o Índice de Diferença Normalizada da Água (do termo em inglês *Normalized Difference Water Index* – NDWI), foi modificado no trabalho de Xu (2006) por substituição de uma banda de infravermelho de ondas curtas (aqui foi utilizada a banda 11 do sistema Sentinel-2). O NDWI modificado ou MNDWI (Índice Modificado de Diferença Normalizada da Água) pode destacar feições de fundo em águas costeiras, ao mesmo tempo em que suprime, e até mesmo remove, de forma eficiente, ruídos produzidos por feições continentais, vegetação e solo. A informação processada usando o NDWI é muitas vezes misturada com o ruído produzido pelas feições continentais, distorcendo a interpretação das áreas de fundo marinho. Consequentemente, o MNDWI é mais adequado para destacar e extrair informações de fundo oceânico por causa de sua vantagem em reduzir e até mesmo remover o ruído produzido pelo método NDWI (XU, 2006).

A equação da matemática de bandas do MNDWI (Equação 2.1) pode ser representada por:

$$MNDWI = \frac{B03 - B11}{B03 + B11} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde a banda 03 corresponde ao comprimento de onda do verde e a banda 11 corresponde ao infravermelho de ondas curtas (SWIR 1). O uso deste método possibilitou uma resposta ainda melhor que o método NDWI, visto que este último usa a banda do intervalo do infravermelho próximo (NIR), obtendo uma resposta de qualidade inferior em relação ao MNDWI.

Dentre os vários modelos matemáticos tridimensionais da superfície terrestre, destaca-se o modelo proveniente da missão SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), que teve duração de 11 dias, e no qual foram obtidos dados topográficos sobre 80% da superfície terrestre entre os paralelos 60°N e 56°S (USGS, 2015). Os dados SRTM possuem resoluções de 90m e de 30m, mas esta última só passou a ser livremente disponibilizada a partir do final de 2014 (BROCHADO, 2015). Este produto pode ser utilizado, dentre inúmeras aplicações, para estudos relacionados à linha de costa e processos neotectônicos envolvidos na sua morfologia atual. Baseado nisso, a neotectônica tem sido alvo de pesquisas desenvolvidas por vários geólogos brasileiros

(SUGUIO e SALLUN, 2004). Suguio e Martin (1996) ressaltam que estes eventos desempenharam um papel muito importante na evolução geológica na linha de costa do Brasil.

Portanto, o PDI de Sensoriamento Remoto trata especificamente das técnicas utilizadas para identificar, extrair, condensar e realçar a informação de interesse para determinados fins, a partir de uma enorme quantidade de dados que usualmente compõem essas imagens (CRÓSTA, 2002). De maneira didática, pode-se pensar nas imagens de sensoriamento remoto como uma matriz de valores, onde cada valor (*pixel*) contém um número associado à reflectância na posição ocupada pelo *pixel*. Seguindo este raciocínio, as técnicas de PDI nada mais são que operações matemáticas realizadas entre os valores dessa matriz primária (imagem) e uma matriz pré-estabelecida contida no *software* de PDI, dando origem a uma nova matriz, que consiste em um produto de PDI (imagem processada).

As informações geradas a partir das imagens obtidas do Sensoriamento Remoto e das aplicações de técnicas de PDI compõem um panorama geral da área, e permitiram uma abordagem introdutória aos resultados obtidos. Os dados de Sensoriamento Remoto utilizados corresponderam as imagens obtidas por sensores ópticos orbitais multiespectrais do sistema Sentinel-2, produzidas pela ESA como parte do programa Copernicus, e que são datadas de 28/10/2016, as quais foram tratadas por meio de técnicas de PDI para o realce das características de interesse, destacando assim as geomorfológicas principais. Para destacar as feições geológicas estruturais, foram utilizadas imagens SRTM com resolução de 30 m, nas quais foram aplicados filtros direcionais (*hillshade*) em *software* de PDI.

A utilização de imagens do sistema orbital Sentinel-2 ocorreu devido a sua melhor resolução espacial (na faixa do visível) e melhor resolução espectral (com intervalos mais restritos) em comparação às imagens Landsat 7 - ETM+ e Landsat 8 - OLI (Figura 2.1).

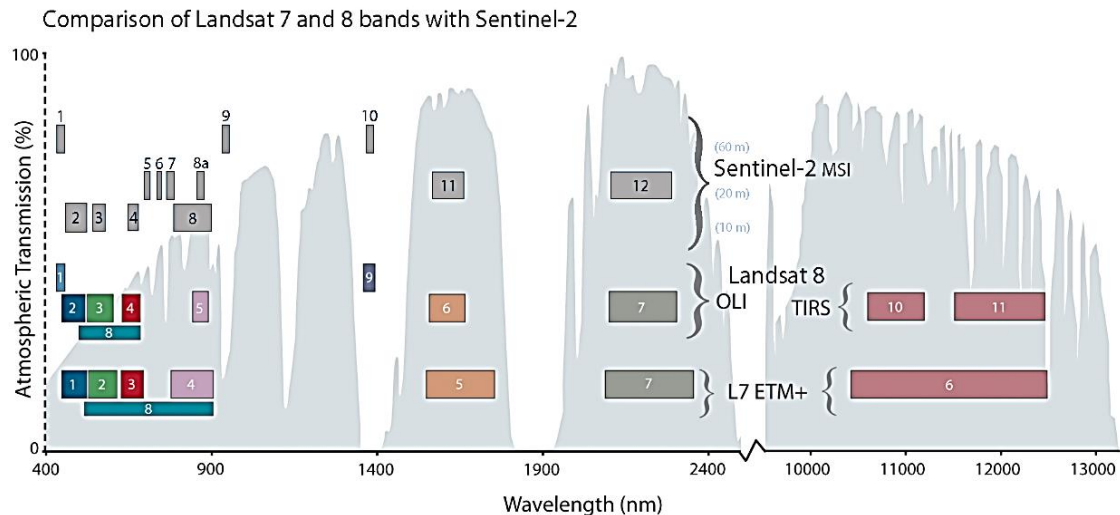


Figura 2.1: Gráfico exibindo os intervalos espectrais dos sistemas Landsat 7, Landsat 8 e Sentinel-2. Os dados do Sentinel-2 têm faixas espectrais muito semelhantes ao Landsat 8 (excluindo as bandas termais do Landsat 8). Extraído de <<https://eros.usgs.gov/sentinel-2>>.

As composições utilizadas neste trabalho foram baseadas nas composições utilizadas por Rios (2015), no entanto, aqui foram adaptadas para serem utilizadas em imagens Sentinel-2.

2.3.2 Vibrotestemunhagem

A vibrotestemunhagem, ou testemunhagem por vibração ou *vibracoring* (SUGUIO, 1998) consiste em um método invasivo de coleta de amostras de sedimentos recentes e tem se revelado muito importante no estudo de sequências sedimentares inconsolidadas ou subconsolidadas (MELO, 2000). A unidade do vibrotestemunhador consiste em um motor a gasolina 4 tempos, que emite vibrações a 3.500 rpm através de um vibrador de laje de concreto fixado por uma mangueira de borracha até chegar numa braçadeira metálica (Figura 2.2a) a um tubo de alumínio ou de PVC, sendo que neste último necessário um rosqueamento interno na ponta (Figura 2.2b) para permitir a inserção de uma ponta de aço vazada (denominada como cortador) (Figura 2.2c), que facilita a penetração no solo, cortando raízes, conchas, pequenos cascalhos e demais obstáculos pela vibração transferida do vibrotestemunhador para o tubo que é inserido no substrato sedimentar.



Figura 2.2: (A) braçadeira, (B) rosca interna para encaixe da estrutura de aço (C) e martelete com adaptação (D). Fonte: o autor.

Também foi testada uma adaptação de um martelete rompedor e bate-estaca (Figura 2.2d) de motor de 2 tempos para substituir o uso da estrutura do vibrotestemunhador (motor, mangueira e braçadeira). Apesar de seu menor tamanho, o uso do martelete se mostrou bem mais eficiente nos levantamentos realizados, podendo substituir tranquilamente os equipamentos usados nos métodos tradicionais de vibrotestemunhagem (Figura 2.3). Este tipo de sondagem normalmente permite a preservação da disposição espacial de estruturas sedimentares e “fósseis” presentes, além do tempo efetuado para perfuração e coleta ocorrerem num menor tempo se comparado ao tempo gasto para usar o vibrotestemunhador. A atividade de campo e a obtenção dos testemunhos de sedimento em cada ponto de amostragem ocorreu entre os dias 19 e 20 de abril de 2016.



Figura 2.3: Processo de aquisição de dados através da testemunhagem do substrato. Em (A) foi usado o vibrotestemunhador convencional, e em (B) foi usado o martelete com adaptação. Fonte: o autor.

A seleção dos pontos de coleta ocorreu baseada no uso das imagens de satélite, que caracterizavam a construção continental pelas barreiras e planícies de intermaré existentes na área de estudo. Logo, para poder melhor avaliá-las foram definidos três perfis de amostragem que pudessem caracterizar este ambiente da planície costeira de

forma mais representativa possível, onde a distribuição dos furos foi segmentada nas zonas leste (distrito de Ibicuitaba), central (distrito de Caiçara) e oeste (distrito de Gamboa). Este mapeamento procurou seguir um perfil transversal às antigas linhas de costa, de forma a observar as mudanças que possam ter ocorrido no material sedimentar da plataforma costeira (Figura 2.4), permitindo assim a obtenção de pelo menos três perfis transversais à linha de costa, o que torna possível compreender como se deu a evolução da região costeira em questão. Assim, baseado nos pontos analisados, foram definidos três perfis: um perfil leste composto pelos pontos F1 e F5, um perfil central composto pelos pontos F2, F3 e F4 e um perfil à oeste composto pelos pontos F6 e F7. Foi utilizado o *software* Autocad 2017 para construção dos perfis de sondagem aqui utilizados.



Figura 2.4: Localização dos furos de sondagem na região de estudo. Fonte: o autor.

Após a coleta e identificação, os testemunhos foram levados para o Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA), onde ocorreu a serragem dos canos (Figura 2.5), dividindo-os ao meio em duas partes iguais. Foi utilizada uma mesa com suporte próprio para o encaixe de canos e uma maquina de serra circular, que possibilitou a serragem dos canos aqui analisados. A serragem dos canos em duas partes iguais permitiu o acesso à estrutura interna do material sedimentar coletado.



Figura 2.5: Preparação dos canos (A) para o processo de serragem e abertura (B), possibilitando a descrição dos testemunhos. Fonte: o autor.

2.3.3 Descrição e Análise de Fácies: Conceitos de Fácies e Associação de Fácies

Sempre foi um desafio para a comunidade geológica a padronização e a simplificação da linguagem técnica visando sintetizar os aspectos descritivos dos dados de campo, facilitando a comunicação entre os geólogos e evitando a criação de uma grande quantidade de nomes e conceitos que, de maneira prática, possuem o mesmo significado.

Partindo disso, a sistematização do conhecimento geológico culminou na criação do conceito de fácies, que de acordo com a definição original de Gressly, em 1838, representa o conjunto das propriedades físicas, químicas e biológicas das rochas que, de maneira integrada, permitem uma descrição objetiva e a diferenciação entre rochas de diferentes tipos (CROSS e HOMEWOOD, 1997). Walker (1992) definiu o termo fácies, dentro do âmbito da sedimentologia, como um corpo rochoso (ou sedimento) caracterizado por uma combinação particular de litotipos, estruturas físicas e/ou biológicas, e que apresenta características diferentes dos corpos a ele sobrepostos, sotopostos e lateralmente adjacentes, ou seja, um corpo sedimentar com características específicas que o distingue de outras unidades rochosas vizinhas. É importante salientar

que a generalidade da definição é justamente a responsável pela sua aceitação na comunidade científica, pois permite uma liberdade de interpretação muito grande e que abrange as diversas nuances dos processos sedimentares existentes nos diversos ambientes deposicionais.

O estudo faciológico nasceu da pesquisa de campo de afloramentos e trincheiras. Por essa razão, sua codificação privilegia, na maioria dos casos, os elementos definidores mais acessíveis nessas condições, como litologia e estruturas internas, a exemplo de propostas como as de Walker (1992) e Miall (1996). Estas propostas geralmente adotam um código de duas a três letras, onde a primeira (maiúscula) refere-se à litologia/granulação e a segunda e/ou terceira (minúsculas) à estrutura sedimentar associada. Neste trabalho adotou-se uma codificação onde as duas primeiras letras (maiúsculas) representam a fração granulométrica na qual o sedimento foi classificado e a terceira letra (minúscula) diz respeito a estruturas ou fragmentos biotécnicos. Essa denominação possibilitou uma melhor definição dos intervalos granulométricos de cada amostra e um maior detalhamento na diferenciação das fácies analisadas.

O reconhecimento e definição de uma dada fácies não são suficientes para caracterizar o seu ambiente de formação, sendo necessário definir de que forma as fácies se associam e se sucedem. Para isso, é utilizada a "Lei da Correlação de Walther" (WALKER, 1984) que diz que, em uma determinada sucessão vertical, uma passagem gradacional entre duas fácies sugere que elas estão associadas, tendo sido geradas em ambientes deposicionais lateralmente contíguos, ao passo que, um contato brusco ou erosivo pode indicar intervalos de não deposição ou mudanças significativas no ambiente deposicional (FERREIRA JÚNIOR e CASTRO, 2001).

Existem várias metodologias para caracterização de fácies, destacando-se a de Selley (1978), que caracteriza as fácies sedimentares segundo cinco parâmetros: geometria, litologia, estruturas sedimentares, distribuição de paleocorrentes e conteúdo fóssilífero. De forma resumida, a caracterização faciológica de corpos rochosos e sedimentos tem por objetivo materializar determinado processo sedimentar físico relacionado à sua gênese, abrangendo as principais características a serem detectadas em campo: litologia, grau de seleção, granulometria, estruturas sedimentares, direção de paleocorrentes, conteúdo fóssilífero e geometria do corpo. A geometria dos corpos sedimentares está parcialmente relacionada à antiga topografia do ambiente deposicional, sendo necessária uma análise do histórico pós-deposicional da região. A composição

mineralógica das rochas detríticas oferece informações sobre a área fonte, ao passo que a granulometria, o grau de seleção e as estruturas sedimentares trazem informações sobre os mecanismos de transporte e deposição, permitindo caracterizar a energia do ambiente deposicional e separando, por consequência, os processos sedimentares envolvidos.

Considerando que uma mesma fácies (e seus processos físicos relacionados) pode ocorrer em sistemas deposicionais distintos, torna-se necessário, defini-la segundo seu contexto deposicional predominante. De forma mais objetiva, cria-se uma associação de fácies visando dar mais importância à relação entre as fácies do grupo, em detrimento da fácies como componente individualizado (COLLINSON, 1969; WALKER, 1983; 1992). As associações de fácies, quando analisadas espacialmente, são usadas para caracterizar os sistemas deposicionais, independentemente da hierarquia adotada (READING, 1996; WALKER, 1992). Em uma associação de fácies, cada unidade representa, isoladamente, o registro da atuação de um determinado processo de formação, e a soma de todos esses processos, levando em conta suas características e inter-relações, permitem um melhor entendimento do ambiente de sedimentação (ETCHEBEHERE e SAAD, 2003). Para Borghi (2000), as associações de fácies representam o registro deposicional de uma história coerente de processos sedimentares e geomorfológicos operantes na evolução de componentes de um cenário paleogeográfico (estáticos ou dinâmicos na sedimentação). De acordo com Reading (1996), associações de fácies constituem grupos de fácies que ocorrem conjuntamente e são geneticamente correlacionadas, com ambientes de sedimentação relacionados. Com base no exposto acima, pode-se dizer que, a associação de fácies é essencial para a interpretação de ambientes deposicionais costeiros, tendo em vista que uma dada fácies isoladamente pode ocorrer em diversos ambientes.

O estudo de fácies aqui apresentado é baseado nos critérios propostos por Walker (1990 e 1992) para modelagem de fácies, que são:

- a) Individualização de fácies a partir do reconhecimento e descrição detalhada de estruturas sedimentares, texturas, geometria e composição litológica, bem como descrição dos processos geradores daquelas características;
- b) Associação de fácies, estando agrupadas as fácies contemporâneas, correlacionadas geneticamente, conferindo a ela conotação ambiental;

- c) Modelo deposicional, sendo este representado em bloco-diagrama, mostrando de forma sintética geral os sistemas deposicionais, onde é observada a relação entre os diferentes paleoambientes.

Os resultados para descrição e separação de fácies sofreram prejuízo devido à baixa representatividade dos testemunhos em relação à camada e às limitações impostas pelo método relacionadas à aquisição das amostras. Desta maneira, aspectos como geometria do corpo e direção de paleocorrentes acabaram tendo um peso menor, ocasionando em um enfoque maior na granulometria, estruturas sedimentares e conteúdo fóssilífero. Quanto aos critérios para definição de limites interfaciológicos de Anderton (1985), é importante deixar claro que os critérios de primeira ordem (feições de base de canais ou superfícies erosivas) e de segunda ordem (feições de base e topo de depósitos intrabaciais) não são identificados em nenhum dos testemunhos, sendo melhor observados em afloramentos. Neste caso, serão levados em consideração os critérios de terceira ordem (mudanças sutis, porém abruptas, de granulação) e quarta ordem (mudanças de estrutura sedimentar sem mudança de granulação).

2.3.4 Análise Granulométrica

A análise granulométrica vem sendo usada a muito tempo por diversos profissionais das áreas de Geociências e áreas correlatas, seja como uma medida descritiva da rocha sedimentar ou como um identificador da disponibilidade de diferentes tipos e tamanhos de partículas oriundas de vários tipos de rocha ou material pré-existente. A diversidade de dimensões envolvidas na análise granulométrica é muito ampla, possuindo várias ordens de grandeza entre os tamanhos característicos. O enfoque que é dado neste trabalho é sobre a ação correspondente das areias e materiais de origem biológica (e seus fragmentos), pois esses são os materiais de maior interesse nos estudos de praias, uma vez que são os principais tipos de material envolvidos no transporte de sedimentos associado aos agentes motrizes atuantes.

Em relação à sua dinâmica, a granulometria do sedimento influencia diretamente o processo de transporte, pois tanto o movimento incipiente como os modos de transporte são estreitamente dependentes do tamanho do grão (VELOSO, 2001). Os materiais sedimentares naturais normalmente apresentam forma irregular e uma mistura de sedimentos é composta de grãos de diferentes formas. Logo, a adoção do diâmetro como parâmetro representativo do tamanho do grão partícula é passível de discussão. Neste

trabalho a denominação do tamanho do grão estimado pelo método do peneiramento é feita, por simplicidade, através do termo diâmetro, que corresponde àquele definido como "diâmetro de peneiramento".

Para a obtenção de dados de granulometria, o primeiro passo foi preparar as amostras para peneiramento. Primeiramente, as amostras foram submetidas a elutriação em água corrente na peneira de $63\ \mu\text{m}$ (4Φ) para remoção das frações silto-argilosas e sais solúveis. Logo após, as amostras foram colocadas para secar na estufa por um período de pelo menos 24 horas a 60°C (Figura 2.6). Passado este processo de secagem, as amostras foram submetidas ao ensaio de peneiramento no *rotap* (Figura 2.7), onde foram submetidos a vibração por 10 minutos. Passado este período, o sedimento retido em cada peneira foi pesado e separado.

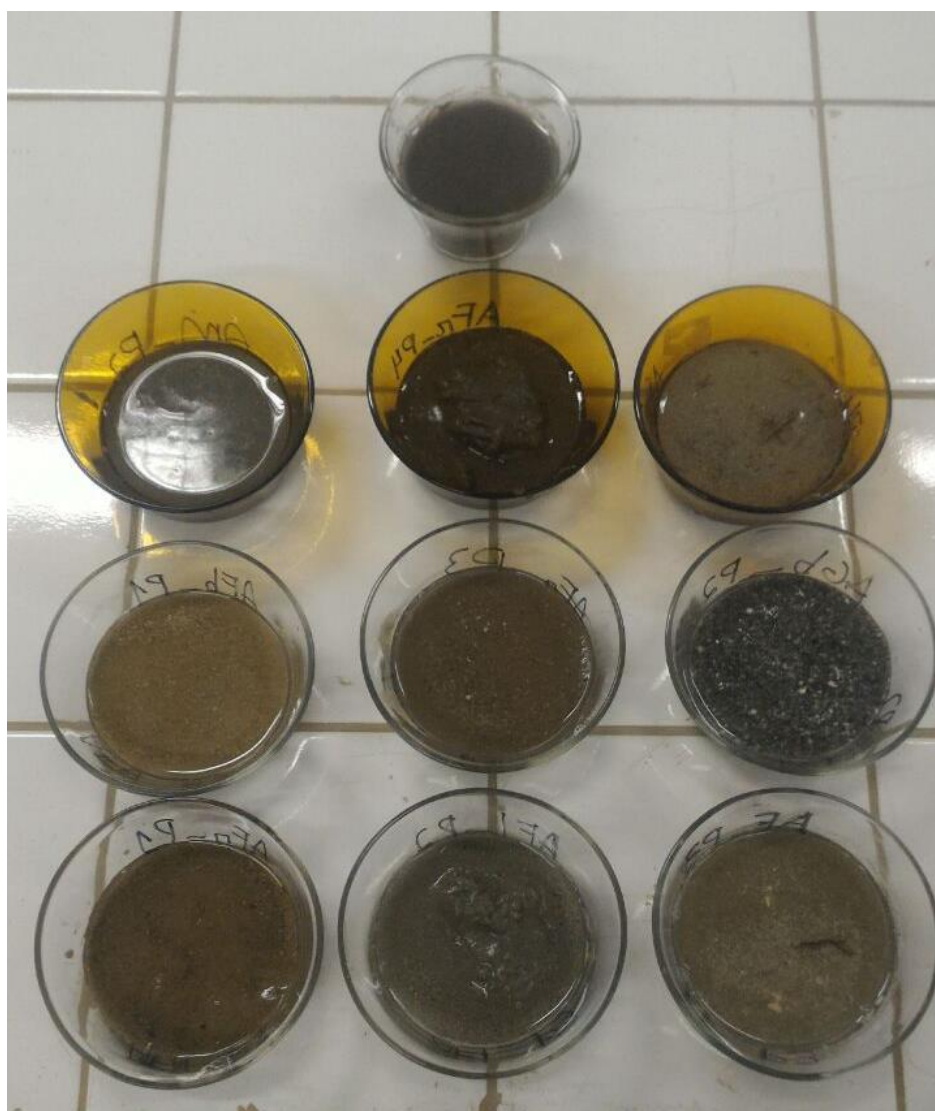


Figura 2.6: Amostras submetidas a elutriação na peneira de $63\ \mu\text{m}$ (4Φ), onde foram posteriormente submetidas a secagem em estufa. Fonte: o autor.



Figura 2.7: Amostras submetidas ao ensaio de peneiramento usando as peneiras de 1000 μm (0 Φ), 500 μm (1 Φ), 250 μm (2 Φ) 125 μm (3 Φ), 63 μm (4 Φ) (de cima para baixo, nesta sequência). Fonte: o autor.

Para estudar a distribuição granulométrica dos sedimentos foi preciso, obviamente, utilizar uma escala. As primeiras escalas a serem utilizadas foram as aritméticas, como por exemplo a escala milimétrica. No entanto, já foi constatado a muito tempo que as escalas lineares ou aritméticas não são adequadas para a obtenção de bons resultados em análises granulométricas. Normalmente, quando se observa a distribuição das dimensões granulométricas utilizando escalas aritméticas, verifica-se que essa distribuição é sistematicamente assimétrica, ou seja, a maior parte das dimensões granulométricas concentra-se nos intervalos dos sedimentos finos (Figura 2.8). Desta maneira, amostras de sedimentos muito diferentes podem aparentar ter uma granulometria semelhante, o que, obviamente, não é indicado para o estudo e determinação das suas diferenças. Por essa razão, começou-se a tentar descrever as análises granulométricas com base em escalas geométricas ou logarítmicas (DIAS, 2004).

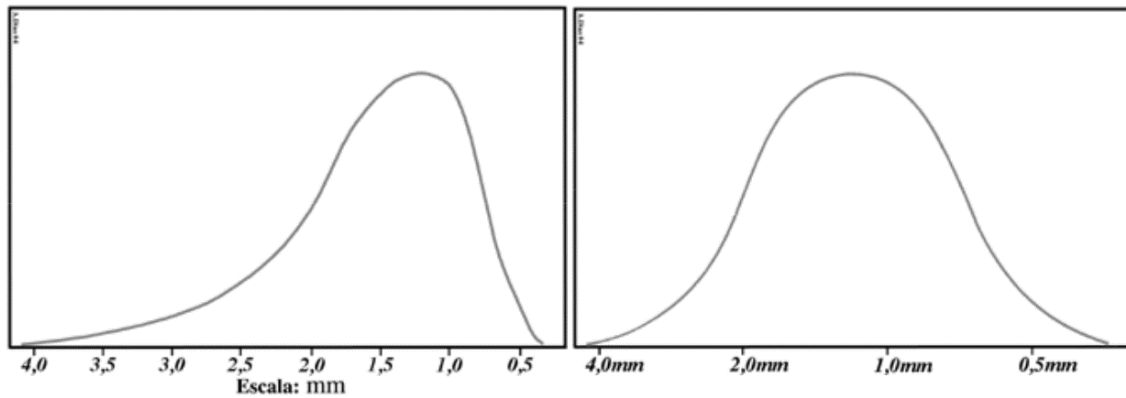


Figura 2.8: Distribuição granulométrica de um sedimento hipotético, representada numa escala milimétrica (à esquerda) e distribuição granulométrica do mesmo sedimento representado numa escala logarítmica (à direita). Extraído de Dias (2004).

Assim, foi desenvolvida uma escala geométrica utilizando potências de 2, a qual foi originalmente proposta por Udden (1898) e Wentworth (1922), porém foi Krumbein (1936), ao propor a transformação logarítmica, que viria verdadeiramente a criar a escala *phi* (ϕ). Como a grande maioria dos grãos sedimentares praias têm diâmetro inferior a 1mm, a transformação logarítmica propriamente dita teria como consequência a utilização de valores negativos, o que dificultaria os cálculos. Para contornar este inconveniente, Krumbein (1936) propôs a utilização dos valores negativos do logaritmo da dimensão da partícula em milímetros. A Tabela 2.1 ilustra de forma didática a conversão entre as medidas aritméticas (em mm) e logarítmicas (escala ϕ).

Tabela 2.1: Correspondência para a escala milimétrica e a escala *phi* (ϕ). Adaptado de Dias (2004).

ϕ	Fração do Sedimento	mm
- 4	cascalho muito grosso	16
- 3	cascalho grosso	8
- 2	cascalho médio	4
- 1	cascalho fino	2
- 0	areia muito grossa	1,000
- 1	areia grossa	0,500
- 2	areia média	0,250
- 3	areia fina	0,125
- 4	areia muito fina	0,0625

Assim, a escala ϕ é definida pela Equação 2.2:

$$\phi = -\log_2 \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (\text{Equação 2.2})$$

Onde d representa o diâmetro da partícula em milímetros e d_0 é o diâmetro de referência (1 mm), que é usado para dar consistência dimensional à escala.

2.3.5 Análise Granulométrica Aplicada a Sedimentos Praiais

Segundo Martins (2003), os sedimentos praiiais, em geral, têm sua granulometria variando de areia muito fina a média, enquanto que a dos sedimentos fluviais varia de areia média a grossa, no entanto, devido a um aumento na oferta de sedimentos, a praia pode vir a ser composta tanto por frações granulométricas do tipo areia e cascalho (seixo e/ou granulo), como por sedimentos mais finos (FRIEDMAN, 1967). Segundo Muehe (1996), as areias são encontradas na região praiial como um todo, na porção emersa da praia (que compreende as dunas, o pós-praia e a face da praia), bem como na antepraia (que engloba as zonas de surfe e arrebentação), na plataforma continental interna e em áreas estuarinas. Estes sedimentos apresentam diversos minerais na sua composição (feldspato, quartzo, calcário, conchas e seus fragmentos), além das frações silte e argila (KING, 1972).

Parâmetros Estatísticos

Devido a curva de distribuição granulométrica se assemelhar a uma curva normal (ou gaussiana), esta vem sendo usada como parâmetro de comparação em análises granulométricas. Normalmente são utilizados três tipos de medidas descritivas, que são (DIAS, 2004):

- Medidas de tendência central (mediana, a média e a moda): permitem saber se, em média, as partículas que constituem uma distribuição são mais ou menos grossas do que as de outra distribuição; frequentemente está relacionado com a intensidade do agente de transporte e/ou com os níveis energéticos do ambiente deposicional;
- Medidas de dispersão ou de uniformidade (como o desvio padrão): expressam a maior ou menor concentração de partículas em torno da média; frequentemente, estas medidas traduzem a constância ou a irregularidade dos níveis energéticos;
- Medidas de assimetria da curva: denotam o enriquecimento da população granulométrica em finos ou em grossos, que provocam desvios relativamente à curva normal;

Estes parâmetros estatísticos são normalmente referidos como parâmetros granulométricos. Neste trabalho foi dado um enfoque maior em três parâmetros

estatísticos principais, que são: diâmetro médio, desvio padrão e assimetria, onde foram elaborados diagramas de pontos que correlacionam (dois a dois) estas variáveis.

a.) *Média e mediana*

Média (M): É uma medida de tendência central (Tabela 2.2). Esta média reflete a média granulométrica dos sedimentos ou diâmetro médio, e desta forma, está geralmente associada à competência do agente transportador em relação aos processos deposicionais, e à influência da fonte de suprimentos do material (FRAZÃO, 2003). No quadro abaixo o diâmetro médio está representado segundo a escala ϕ .

Tabela 2.2: Classificação do diâmetro médio dos intervalos segundo a escala ϕ . Extraído de Folk e Ward (1957).

ϕ	Classificação de Diâmetro Médio
0 a 1	areia muito grossa
1 a 2	areia grossa
2 a 3	areia média
3 a 4	areia fina
> 4	areia muito fina

O cálculo do diâmetro médio é representado pela Equação 2.3 (FOLK e WARD, 1957), onde o número ao lado da letra grega ϕ (fi) representa o percentil usado:

$$M = \frac{\phi 16 + \phi 50 + \phi 84}{3} \quad (\text{Equação 2.3})$$

b.) *Desvio Padrão*

Desvio Padrão (δ): está diretamente relacionado ao grau de seleção, é a medida do grau de dispersão da medida dos diâmetros médios dos sedimentos. Representada pela Equação 2.4 (FOLK e WARD, 1957):

$$\delta = \frac{\phi 84 - \phi 16}{4} + \frac{\phi 95 - \phi 5}{6,6} \quad (\text{Equação 2.4})$$

O grau de seleção indica a maturidade textural do sedimento. A maturidade de um sedimento detrítico é uma medida do quanto o sedimento foi intemperizado, transportado e retrabalhado, até atingir o produto final. A Tabela 2.3 sintetiza a forma de caracterizar o material sedimentar baseado no desvio padrão.

Tabela 2.3: Classificação do grau de seleção com base no valor do desvio padrão. Adaptado de Rios (2011).

ϕ	Classificação de Grau de Seleção
< 0,35	muito bem selecionado
0,35 a 0,50	bem selecionado
0,51 a 1,00	moderadamente selecionado
1,01 a 2,00	pobrememente selecionado
2,01 a 4,00	muito pobrememente selecionado
> 4,00	extremamente mal selecionado

Davis Jr. e FitzGerald (2004) afirmaram que os sedimentos mais finos tendem a sofrer deposição em ambientes costeiros de baixa energia, ao passo que as frações arenosas tendem a se acumular em ambientes de alta energia. A ação de eventos extremos como tempestades, no entanto, pode alterar temporariamente a energia do ambiente, facilitando o transporte e a deposição de sedimentos mais grossos durante estes eventos (KOMAR, 1998). A quantidade relativa de sedimentos mais grossos é maior em praias nas adjacências das desembocaduras fluviais, em função da proximidade da área fonte (BIRD, 2008).

c.) *Assimetria*

Assimetria (S_K): representa a disparidade entre a quantidade de sedimentos presentes em cada uma das frações granulométricas de uma determinada amostra, influenciando diretamente no grau de deformação da curva de frequência (para a direita ou para a esquerda), analisando-se a relação entre a moda, a média e a mediana (Tabela 2.4) (DIAS, 2004).

Tabela 2.4: Classificação da assimetria entre os dados de média, mediana e moda das amostras segundo a escala ϕ . Extraído de Folk e Ward (1957). Fonte: o autor.

ϕ	Classificação de Assimetria
-1,00 a -0,30	muito negativa
-0,29 a -0,10	negativa
-0,09 a 0,10	aproximadamente simétrica
0,11 a 0,30	positiva
0,31 a 1,00	muito positiva

Quando os valores de moda, média e mediana forem iguais, a distribuição é considerada simétrica, e quando são diferentes, a distribuição é tida como assimétrica (ANDRIOTTI, 2003). Conforme exposto na Figura 2.9, a assimetria positiva ocorre quando a cauda da curva de distribuição é mais acentuada na direção dos grãos mais finos,

enquanto a assimetria negativa ocorre quando a cauda é mais acentuada na direção dos grãos mais grossos (DIAS, 2004). É representada pela Equação 2.5 (FOLK e WARD, 1957):

$$S_K = \left(\frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} \right) + \left(\frac{\phi_{50} + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_{5})} \right) \quad (\text{Equação 2.5})$$

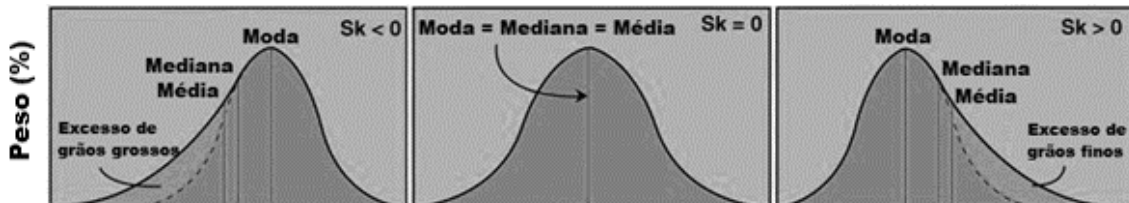


Figura 2.9: Diferenças entre as curvas de distribuição de assimetria, destacando o excesso de grãos (grossos ou finos) em relação à assimetria positiva ou negativa. Adaptado de Rios (2011).

Na análise de sedimentos, Duane (1964), Martins (1965) e Friedman (1961; 1967) afirmaram que a assimetria é um parâmetro relacionado de maneira essencial ao ambiente de deposição e que geralmente sedimentos praias têm assimetria negativa, enquanto sedimentos de rios e dunas, assimetria positiva. Friedman (1961) e Martins (1965; 2003) afirmaram que assimetria positiva ocorre devido à ação unidirecional do agente transportador (ambiente fluvial e eólico), ao passo que a assimetria negativa é causada através da separação ou adição de material grosso (ambiente praias). Duane (1964) afirmou que a assimetria negativa em sedimentos praias ocorre somente em litorais cujo regime é dominado essencialmente por ondas e correntes costeiras. Friedman (1961) considerou que, apesar de os sedimentos praias poderem se apresentar com assimetria positiva, estes podem ser distinguidos de sedimentos fluviais pelo seu grau de seleção maior que dos sedimentos de rio.

Tratamento de Dados de Análise Granulométrica

Nesta etapa foram obtidos os dados estatísticos a partir das análises granulométricas, possibilitando a classificação dos sedimentos obtidos na vibrotestemunhagem de acordo com a escala ϕ , proposta por Krumbein (1936), e com a classificação textural proposta por Folk e Ward (1957). Foi utilizada um macro de nome Gradistat v.8.0 do *software* Microsoft Excel para tratar os dados, que possibilitou a obtenção dos parâmetros estatísticos (média, mediana, grau de assimetria, grau de seleção) e a classificação do material sedimentar.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 SENSORIAMENTO REMOTO E PDI

As técnicas de PDI envolveram composições coloridas nos sistemas de cores *Red-Green-Blue* (RGB) e *Intensity-Hue-Saturation* (IHS), composições híbridas, métodos de razões de bandas, como o *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI), realce dos contrastes pela manipulação dos histogramas aplicadas nas imagens Sentinel-2 e interpretação de padrões de drenagens na escala de 1:100.000 usando imagens SRTM de resolução espacial de 30 m. Assim, foi possível analisar e interpretar os dados contidos nas imagens, identificando as unidades geológicas e geomorfológicas e os lineamentos estruturais, fundamentais na avaliação dos alvos geológicos e nos mapeamentos realizados.

Inicialmente foram criados três produtos, onde o primeiro representa uma composição colorida RGB composta pela combinação das bandas do visível, como a composição R4-G3-B2 (Figura 3.1), e que teve como objetivo inicial mostrar as feições estudadas da forma mais próxima da realidade. Apesar da simplicidade da imagem em “cor real”, ela foi bastante útil para identificar feições superficiais continentais e marinhas, já que a resposta espectral desta imagem é muito semelhante a que o sistema visual humano está habituado. Dunas e solo exposto foram evidenciados em tonalidades claras em todas as composições RGB devido à baixa absorção da radiação eletromagnética de suas superfícies, isso fica evidenciado em todas as bandas do espectro eletromagnético deste sensor óptico.

O segundo produto gerado foi uma composição R12-G11-B8A (Figura 3.2), na qual os comprimentos de onda das bandas não fazem parte do visível, sendo a composição colorida por elas formada chamada de falsa cor por entrar na área do espectro eletromagnético do infravermelho. Neste caso, foram realçados em coloração esbranquiçada os depósitos praias devido à baixa absorção do solo exposto no espectro infravermelho, correspondendo a banda 11 (SWIR 1) no canal verde, e a banda 12 (SWIR 2) no canal vermelho. Contrastantemente, ocorreram as áreas úmidas com cores em azul escuro devido a banda 8A (*vegetation red edge*) se encontrar no canal do azul, e que estão relacionadas aos manguezais e aos depósitos de supramaré. Esta banda apresenta reflectância nula para água do mar, tanques evaporadores das salinas e tanques de carcinicultura. Destaca-se ainda nesta imagem os sedimentos em suspensão transportados

e bancos areno-lamosos submersos ao longo da costa pelo contraste entre a alta reflectância do sedimento e baixa reflectância dos corpos d'água.



Figura 3.1: A composição R4-G3-B2 (cor real) identificou feições continentais e marinhas com cores mais próximas da realidade e melhor resolução espacial. Logo, nesta imagem podem ser destacadas as principais feições geomorfológicas, como a zona estuarina (hoje ocupada pelas salinas, tanques de carcinicultura e pela zona de manguezal), as barreiras e o banco de algas junto à costa.

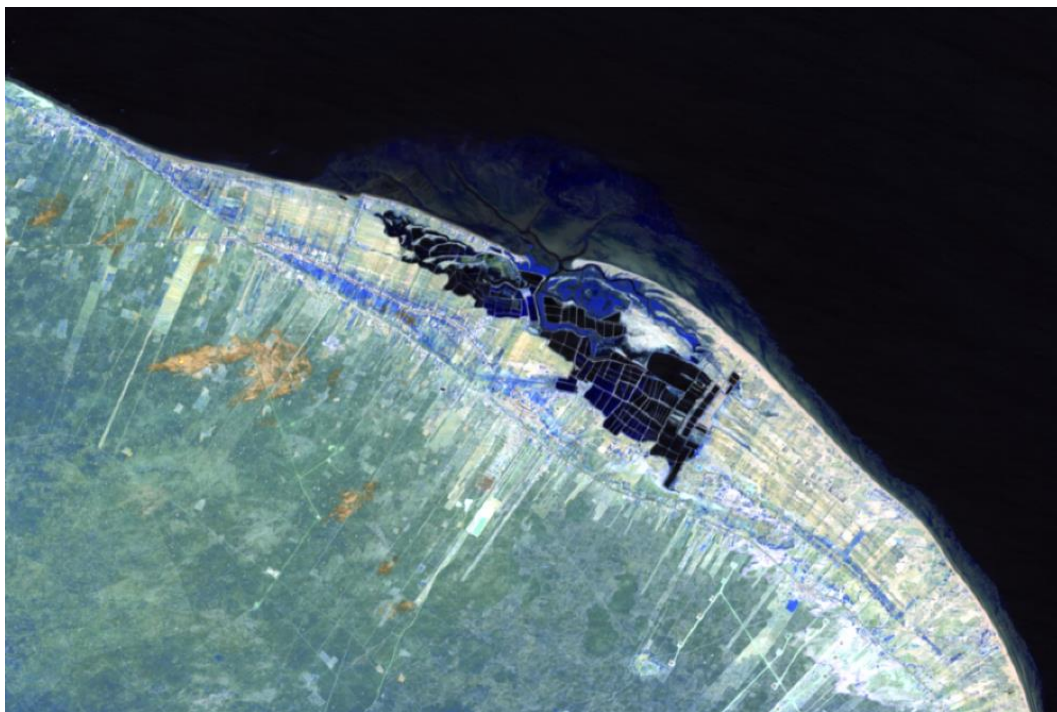


Figura 3.2: A composição R12-G11-B8A (falsa cor) gerou uma imagem com bandas do infravermelho próximo (*Red Edge*) e infravermelho de ondas curtas (SWIR), destacando os depósitos eólicos, praias, de supamaré e de intermaré, bem como as superfícies com vegetação nestas porções.

Assim como na composição anterior obteve-se uma falsa cor para o terceiro produto, de composição R2-G8A-B12 (Figura 3.3), na qual as áreas lamosas foram realçadas em cor verde vibrante devido a banda 8A (*vegetation red edge*) se encontrar no canal verde. Os depósitos praiiais, bem como os campos de dunas e solo exposto, foram evidenciados em cores claras (com muito brilho) em virtude da baixa absorção em todos os canais, principalmente na porção leste da imagem.

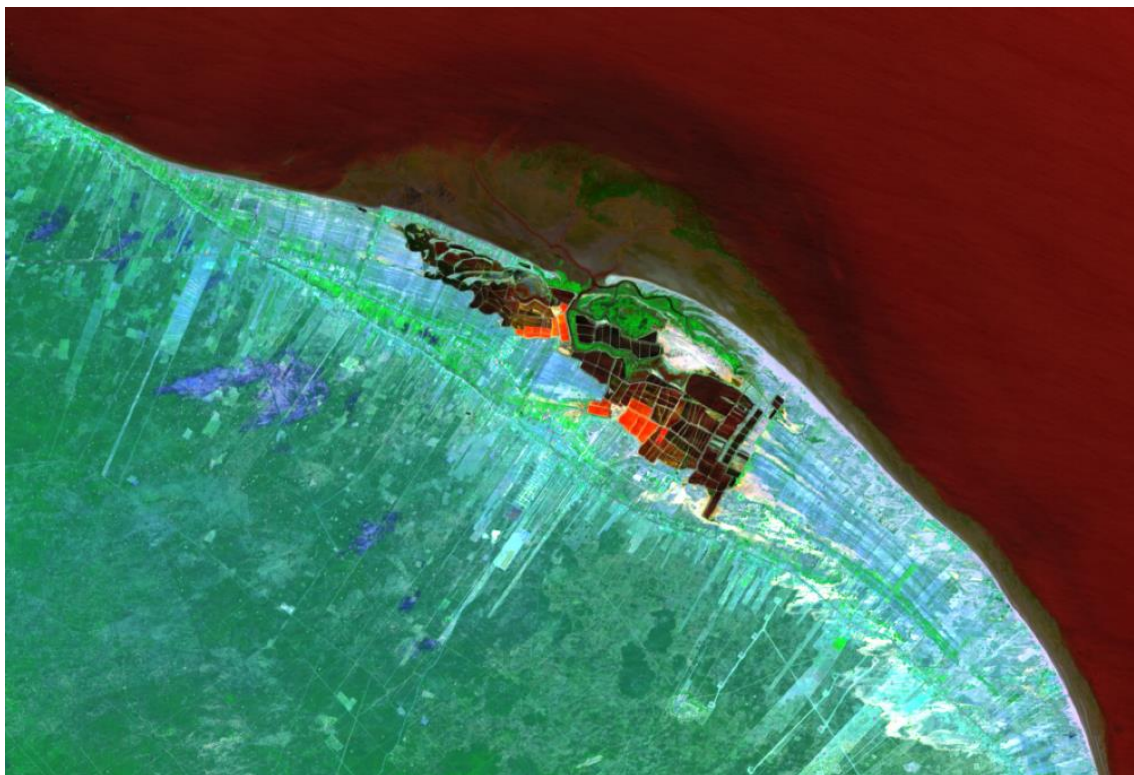


Figura 3.3: A composição R2-G8A-B12 (falsa cor) realçou as estruturas de canais de maré devido ao contraste de absorção da radiação eletromagnética entre as bandas 2 (Azul) e 12 (SWIR).

Cada triplete foi convertido individualmente para o sistema IHS, onde o *Hue* (H), ou matiz, definiu a cor espectral dominante. Sua utilização em cada composição RGB resultou em tonalidades de cores mais vibrantes e o emprego do modo *Intensity* gerou um melhor contraste para as morfologias costeiras. Desta forma, o *Hue* 2-8A-12, no canal do vermelho, realçou as barras arenosas, os campos de dunas e as feições de solo exposto. Já o *Hue* 12-11-8A, inserido no canal do verde, ressaltou as áreas lamosas em tonalidades verdes. O *Hue* 4-3-2, no canal do azul, distribuiu a composição do espectro eletromagnético visível com uma escala azul variando de claro a escuro. A conversão dos tripletes RGB para o sistema HRGB resultou em tonalidades de cores vibrantes, sendo conveniente a aplicação do filtro passa alta, do tipo *Laplaciano* de dimensão 5x5, ao canal do *Intensity* (I) com o triplete 4-3-2, que distribui de forma homogênea o contraste da

imagem que melhor individualiza as feições costeiras de uma forma geral e também serviu para realçar os lineamentos estruturais de subsuperfície relacionados aos canais de maré. A partir da combinação destes 4 produtos, foi criada a composição híbrida HRGBI (2-8A-12) – (12-11-8A) – (4-3-2) – (4-3-2), que teve os histogramas correspondentes a cada canal manipulados (Figura 3.4).

A composição híbrida HRGBI acima citada serviu para caracterizar as feições geológicas, geomorfológicas e estruturais da planície costeira de Icapuí/CE, obtendo uma boa resposta espectral principalmente para os sedimentos praias e para as áreas que apresentam barras arenosas correspondentes à progradação da linha de costa, servindo também para a delimitação do espaço referente à laguna (zona de manguezal, tanques de salinas e de carcinicultura), aos canais de maré e à zona urbana. Essa composição híbrida foi a que apresentou os melhores resultados para uma diferenciação das feições superficiais como um todo, pois nela podem ser identificados os sedimentos praias (em vermelho), as áreas que apresentam as barras arenosas (em rosa), a região lagunar (zona de manguezal e salinas) em verde claro a escuro e a zona urbana em amarelo.

Um segundo produto também foi gerado a partir de uma composição híbrida HRGBI usando uma combinação de três tripletes IHS semelhante à anterior, mas desta vez foi usado o método MNDWI, sendo a banda 03 correspondente ao comprimento de onda do verde e a banda 11 corresponde ao infravermelho de ondas curtas (SWIR 1). O uso deste método possibilitou uma resposta ainda melhor que o método NDWI, visto que este último usa a banda do intervalo do infravermelho próximo (NIR), obtendo uma resposta de qualidade inferior em relação ao MNDWI.

A partir da combinação dessas duas bandas e da sua alocação no canal do *Intensity*, foi possível destacar os canais de maré que não seriam tão evidenciados em outras composições. Apesar da perda na resposta espectral na porção continental, houve um ganho considerável no destaque das feições submersas. Após a montagem da composição híbrida, os histogramas gerados foram manipulados e a composição do *Intensity* recebeu uma filtragem do tipo *Laplaciano 5x5* (Figura 3.5).

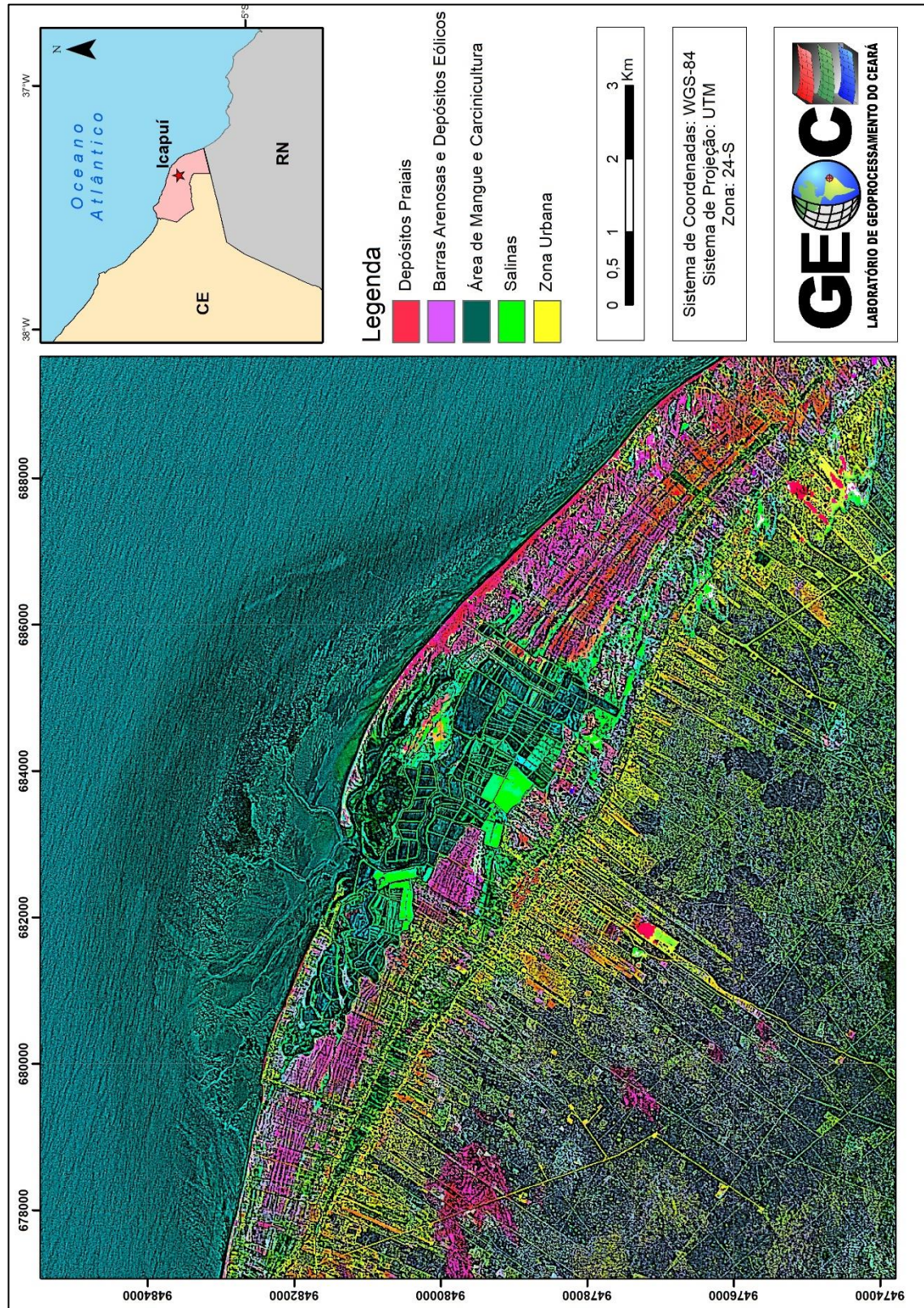


Figura 3.4: Composição HRGBI (2-8A-12) – (12-11-8A) – (4-3-2) – (4-3-2) a partir da combinação de quatro tripletes de bandas com a aplicação do filtro passa alta do tipo *Laplaciano* de dimensão 5x5 à imagem do canal do *Intensity* (I).

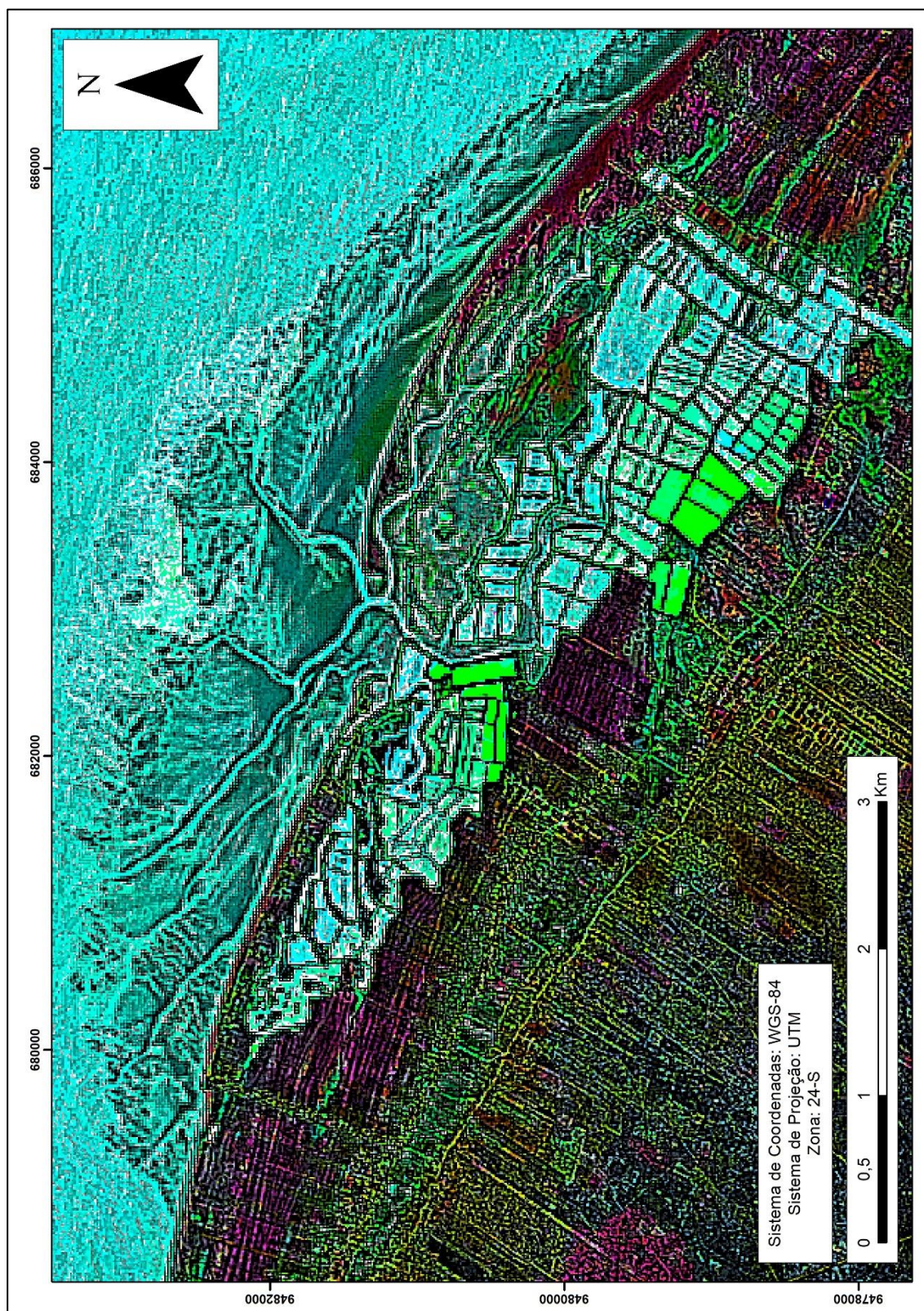


Figura 3.5: Composição HRGBI (2-8A-12) – (12-11-8A) – (4-3-2) – (3-11) a partir da combinação de quatro combinações de bandas com a aplicação do filtro passa alta do tipo *Laplaciano* de dimensão 5x5 e do método MNDWI à imagem do canal do *Intensify* (1).

Esta imagem foi usada para a caracterização das feições submersas na zona do banco de algas defronte à zona costeira do município, visto que ela destaca muito bem os canais de maré existentes na região. Acredita-se que, devido à influência neotectônica das falhas tectônicas ocorridas durante o processo de separação dos continentes Africano com o Sul-americano no Cretáceo, as falhas de Afonso Bezerra e Carnaubais tenham influenciado no direcionamento dos canais. Na Bacia Potiguar são representados em um par conjugado de falhas com direcionamentos opostos, no caso são apresentados pelos lineamentos Afonso Bezerra (NW-SE) e Carnaubais (NE-SW) (Figura 3.6). A influência neotectônica é vista pelos *trends* preferenciais que são formados nos canais de maré existentes na área de estudo, que teriam se posicionado seguindo os lineamentos do referido sistema de falhas, com uma maior influência dos lineamentos Afonso Bezerra.

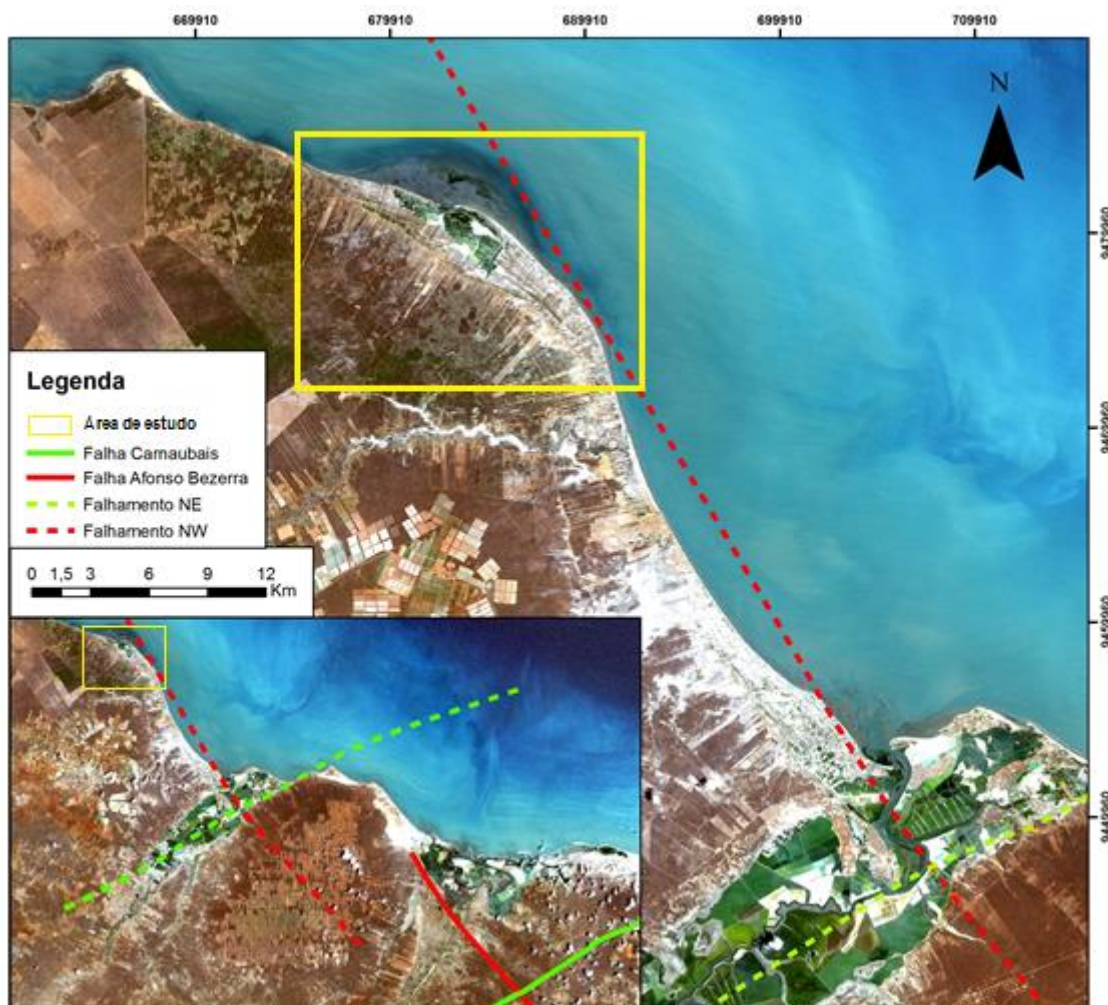


Figura 3.6: Mapa exibindo a disposição do sistema de falhas Carnaubais (em verde) e Afonso Bezerra (em vermelho) com as linhas tracejadas representando os possíveis falhamentos que possam ter influenciado no atual posicionamento dos canais de maré e da morfologia costeira da região. Fonte: o autor.

Este último produto foi submetido a uma filtragem passa alta direcional do tipo *Sharpen 5x5*. Como o objetivo foi destacar os canais de maré existentes, e observando uma tendência natural destes canais a se posicionarem nos sentidos NE-SW e NW-SE, foram selecionados os filtros direcionais nestas mesmas direções, sendo as estruturas NE-SW melhor destacadas usando o filtro direcional SE (Figura 3.7) e as estruturas NW-SE melhor observadas usando o filtro direcional NE (Figura 3.8). O filtro passa alta foi útil também para destacar as barras arenosas existentes na porção continental do litoral.

Ao observar o posicionamento dos lineamentos destacados nas figuras anteriores, pode-se notar a influência do controle estrutural exercido na morfologia costeira, representada pelos canais de maré (Figura 3.9). Com os dados atuais não é possível estabelecer maiores detalhes sobre esta influência, no entanto, é possível ver que a posição dos canais de maré (principalmente os orientados no sentido NE-SW) segue um *trending* regional. Possivelmente existe alguma influência das correntes de deriva litorânea e da corrente do próprio canal de maré, no entanto, acredita-se que essa influência tenha um menor peso, pois o regime de marés não tem uma amplitude tão alta (regime de mesomarés) e o estuário não está ligado a nenhum rio, que são inexistentes na região de influência da área de estudo.

Para tentar complementar os dados referentes à influência neotectônica na área de estudo, foram interpretados padrões de drenagens com densidade de 500 em imagens SRTM usando filtros direcionais (*hillshade*) nas direções NE-SW e NW-SE para a região continental (Figura 3.10). Também foram adicionados à interpretação uma seção sísmica (Figura 3.11) usando a técnica de GPR (*Ground Penetration Radar*) na região do sistema de lineamentos Ponta Grossa - Fazenda Belém a partir de dados de campo de Sousa (2002).

O padrão de drenagens mostra que o sistema de lineamentos Ponta Grossa - Fazenda Belém (sistema interpretado pela autora acima citada como uma estrutura em flor positiva) forma um padrão de drenagens com fluxo aproximadamente no sentido oeste-leste, com algumas drenagens truncando as paleofalésias. Este padrão de drenagens pode ser um indício sobre como o padrão de lineamentos favoreceu o posicionamento das drenagens que poderiam ter alimentado o sistema estuarino no passado, ou pelo menos ter favorecido a confluência das águas superficiais, para promover a formação do canal de maré.

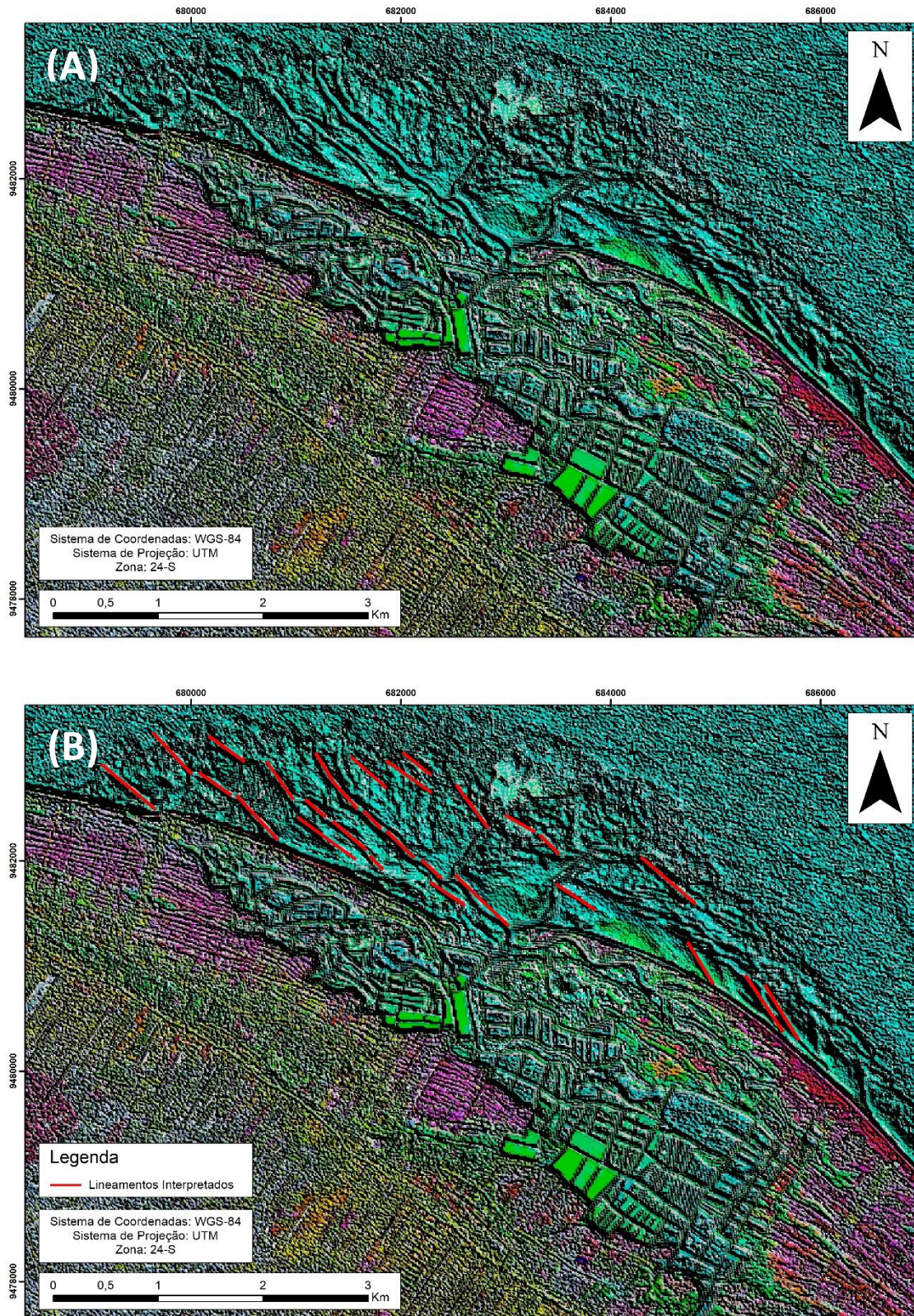


Figura 3.7: Em (A), composição HRGBI (2-8A-12) – (12-11-8A) – (4-3-2) – (3-11) a partir da combinação de quatro combinações de bandas com a aplicação do filtro passa alta do tipo *Sharpen* de dimensão 5x5 ao canal do *Intensity* (I) e filtro direcional NE. (B): Os lineamentos interpretados (em vermelho) sugerem uma tendência dos canais de maré a se posicionarem segundo o sentido NW-SE.

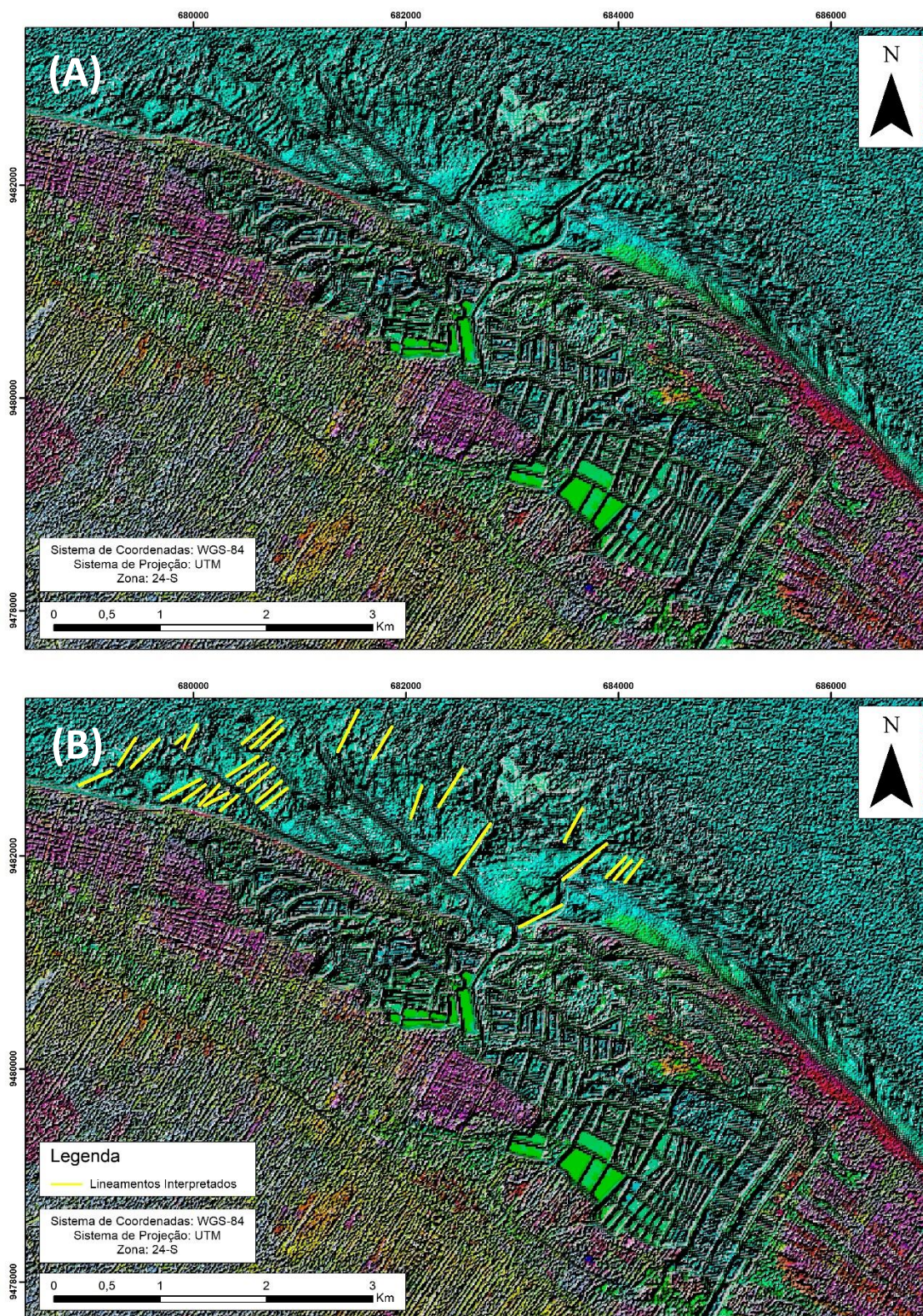


Figura 3.8 - (A): Composição HRGBI (2-8A-12) – (12-11-8A) – (4-3-2) – (3-11) a partir da combinação de quatro combinações de bandas com a aplicação do filtro passa alta do tipo *Sharpen* de dimensão 5x5 ao canal do *Intensity* (I) e filtro direcional SE. (B): Os lineamentos interpretados (em amarelo) sugerem uma tendência dos canais de maré a se posicionarem segundo o sentido NE-SW.

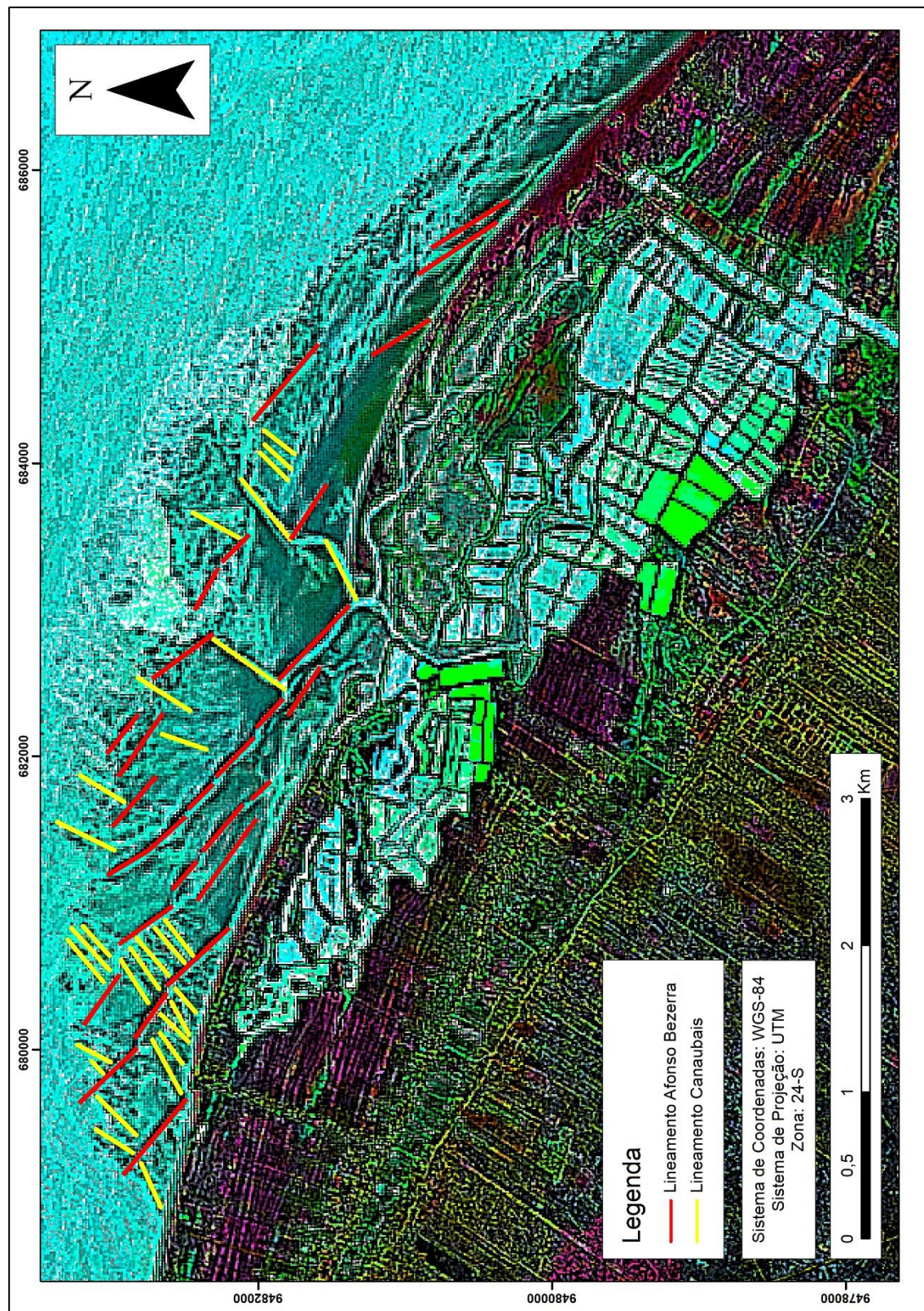


Figura 3.9: Composição HRGBI (2-8A-12) – (12-11-8A) – (4-3-2) – (3-11) a partir da combinação de quatro combinações de bandas com a aplicação do filtro passa alta do tipo *Laplaciano* de dimensão 5x5 e do método MNDWI à imagem do canal do *Intensity* (I) juntamente com a junção dos possíveis lineamentos interpretados (em vermelho e amarelo).

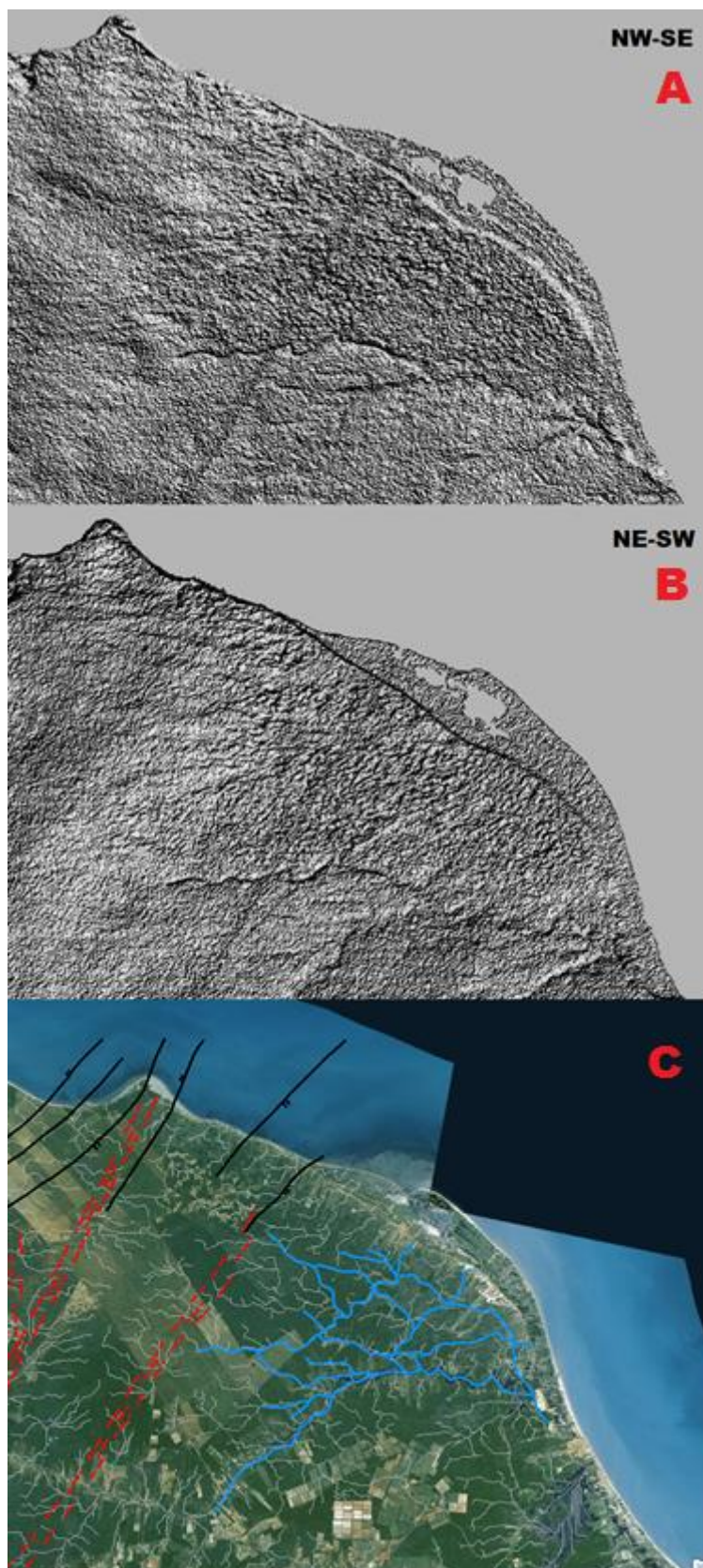


Figura 3.10: Imagens SRTM com filtros direcionais (*hillshade*) destacando os padrões de drenagem nos sentidos NW-SE (A) e NE-SW (B). Em (C), o sistema de falhas Ponta Grossa – Fazenda Belém observado por Sousa (2002) em campo (em vermelho) e por geofísica (em preto) possivelmente exercendo controle sobre o padrão de drenagens da região. As drenagens em cinza foram calculadas para densidade de 500 e as drenagens em azul foram interpretadas na escala de 1:100.000. Fonte: o autor.

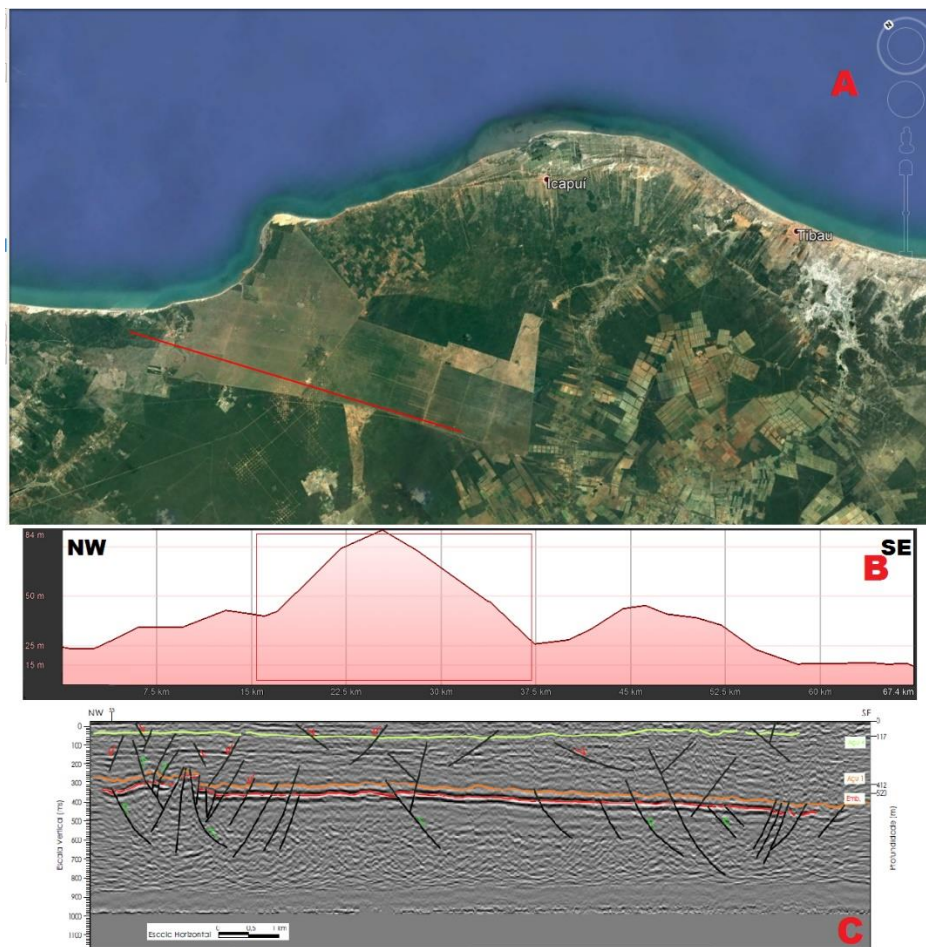


Figura 3.11: Dados geofísicos e interpretação de Souza (2002) relativos à região do sistema de lineamentos Ponta Grossa - Fazenda Belém. Em (A), posicionamento da linha sísmica em relação ao município, em (B), perfil altimétrico das adjacências da linha sísmica em relação com destaque da região com dados de GPR (*Ground-Penetration Radar*) em (C). Fonte: O autor (A e B), Souza (2002) (C).

Logo, é possível supor, como visto nas imagens processadas, que existem indícios de um controle estrutural atuando na área e que obedece às duas direções principais de falhas existentes na região estudada (NE-SW e NW-SE), que são marcadas, principalmente, pelos lineamentos interpretados a partir dos canais de maré submersos e também pelo padrão de drenagens continentais. Esta evidência pode sugerir que a deposição e grande acúmulo de sedimentos na área pesquisada está diretamente relacionada à disposição tectônica de blocos e falhas, que funcionariam como trapas de retenção de sedimentos oriundos do transporte pela deriva litorânea.

3.2 DESCRIÇÃO DE TESTEMUNHOS

Os dados coletados nos testemunhos serão descritos a seguir de acordo com a metodologia acima citada, e foram catalogados de acordo com a Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Descrição dos furos com suas respectivas fácies e as legendas das amostras obtidas.

PONTO	COORDENADAS			FÁCIES DESCRITAS	FURO TOTAL (cm)	FURO RECUPERADO (cm) (%)	LEGENDA DA AMOSTRA
	E	N	Z				
P01	0688209	9477029	4,2253	Areia Fina com Bioclastos; Areia Fina com Raízes	184	161 (87,5 %)	AFb_P01 AFr_P01
P02	0682398	9481487	-1,5888	Areia Fina com Laminação; Areia Grossa com Bioclastos; Areia Média	284,5	162,5 (57 %)	AFI_P02 AGb_P02 AM_P02
P03	0681132	9480980	0,0041	Areia Fina com Bioclastos; Areia Fina com Raízes	166	140 (84,3 %)	AFb_P03 AFr_P03
P04	0681052	9480672	0,9021	Areia Fina com Bioclastos; Areia Fina com Raízes	188	172 (91,4 %)	AFb_P04 AFr_P04
P05	0687471	9476203	1,8742	Areia Fina com Raízes	178	144 (80,8 %)	AFr_P05
P06	0678252	9482592	0,3767	Areia Fina com Laminação; Areia Média	183	149 (81,4 %)	AFI_P06 AM_P06
P07	678133	9481906	0,9378	Areia Fina com Laminação; Areia Fina com Raízes	182	149 (81,8 %)	AFI_P07 AFr_P07

3.2.1 Descrição de fácies

Fácies AFb (Areia Fina com Bioclastos)

Ocorrência: P01, P03, P04

A fácies AFb ocorre nas porções basais dos testemunhos dos pontos P01, P03 e P04, com espessura que varia de aproximadamente 42 a 103 cm, apresentando base indeterminada e contato gradacional no topo da camada (Figuras 3.12 a 3.14). Estão dispostos ao longo do testemunho uma série de bioclastos de tamanho submilimétrico e

ocasionalmente, apresentam-se como rodolitos centimétricos, podendo também apresentar alguns pontos de oxidação (indicando variação de nível do lençol freático) e alguns vestígios e/ou fragmentos de raízes. Foi observada na fácies AFb_P03 laminação aparente plano-paralela localizada e segregação granular de grãos de mica

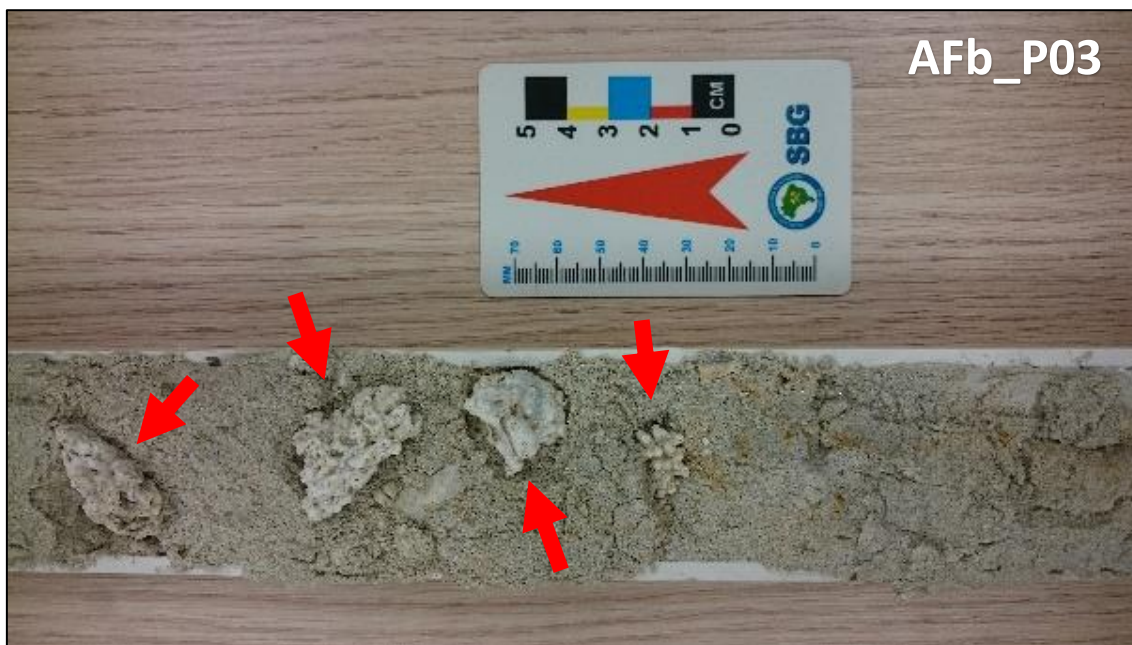


Figura 3.12: Amostra AFb_P03 com rodolitos centimétricos (indicados na figura) de formações coralinas e a presença de algumas marcas de oxidação que podem estar relacionadas a uma variação no nível de lençol freático. Fonte: o autor.



Figura 3.13: Amostra AFb_P01 apresentando bioclastos submilimétricos que ocorrem de maneira dispersa por toda a amostra. Fonte: o autor.



Figura 3.14: Amostra AFb_P04 apresentando rodolitos centimétricos (indicados na figura) que ocorrem de maneira alinhada. Fonte: o autor

Fácies AFr (Areia Fina com Raízes)

Ocorrência: P01, P03, P04, P05, P07

A fácies AFr está ocorre em diversos testemunhos, apresentando-se em tons que variam de cinza claro a castanho escuro (devido à presença de matéria orgânica), e em espessuras que variam de aproximadamente 65 a 145 cm. A fácies ocorre nas porções superiores dos testemunhos, normalmente com contato gradacional na base (com exceção da amostra AFr_P07) e possui diversos fragmentos e vestígios de raízes. São evidenciados também nesta fácies porções de segregação granular micácea inclinada (AFr_P01) e uma possível laminação cruzada não muito bem definida (AFr_P05), além de alguns pontos de oxidação distribuídos (AFr_P05) e que podem significar uma variação no nível do lençol freático. Também pode ser observada no AFr_P03 uma acumulação de rodolitos, fragmentos de corais e de conchas de moluscos com tamanho centimétrico (Figuras 3.15 a 3.19).



Figura 3.15: Amostra AFR_P01 apresentando na porção à esquerda uma segregação granular micácea inclinada. Fonte: o autor.



Figura 3.16: Amostra AFR_P03 com fragmentos e vestígios de raízes distribuídos ao longo da fácies. Fonte: o autor.



Figura 3.17: Amostra AFr_P04 com muitos fragmentos de raízes preservados. Fonte: o autor.



Figura 3.18: Amostra AFr_P05 com marcas de oxidação e alguns fragmentos e vestígios de raízes. Fonte: o autor.

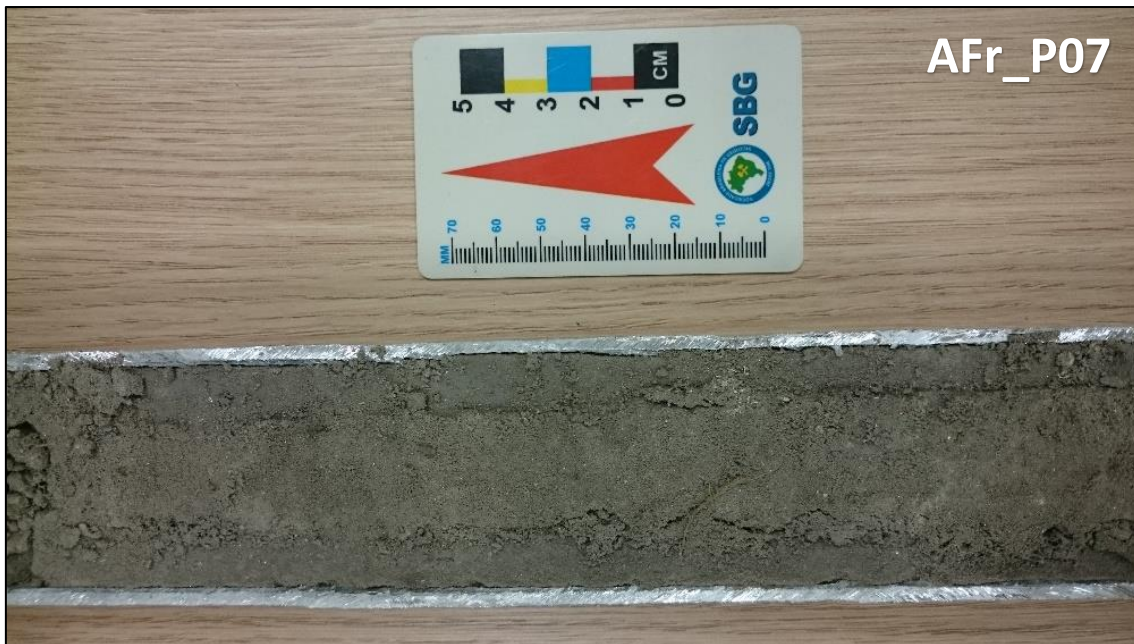


Figura 3.19: Amostra AFr_P07 apresentando alguns fragmentos de raízes e grãos submilimétricos de micas distribuídos ao longo da fácies. Fonte: o autor.

Fácies AFl (Areia Fina com Laminação)

Ocorrência: P02, P06, P07

A fácies AFl apresenta-se nas porções basais dos testemunhos com espessuras que variam de, aproximadamente, 42 a 101 cm, com base indeterminada e topo com contatos gradacionais nas amostras AFl_P02 e AFl_P06 e contatos bruscos na amostra AFl_P07. São observadas laminações plano-paralelas formadas pela segregação granular de grãos de mica (biotita), porém também são encontrados alguns grãos de mica dispersos ao longo dos testemunhos. Raramente também são observados bioclastos de tamanho milimétrico e algumas vezes são vistas marcas de oxidação (Figuras 3.20 a 3.22).



Figura 3.20: Amostra AFI_P02 com laminação aparente plano-paralela ligeiramente deformada, marcada por segregação granular de grãos de mica. Fonte: o autor.



Figura 3.21: Amostra AFI_P06 apresentando segregação granular de grãos de mica (biotita?), marcando uma provável laminação plano-paralela, além de algumas marcas de oxidação. Fonte: o autor.

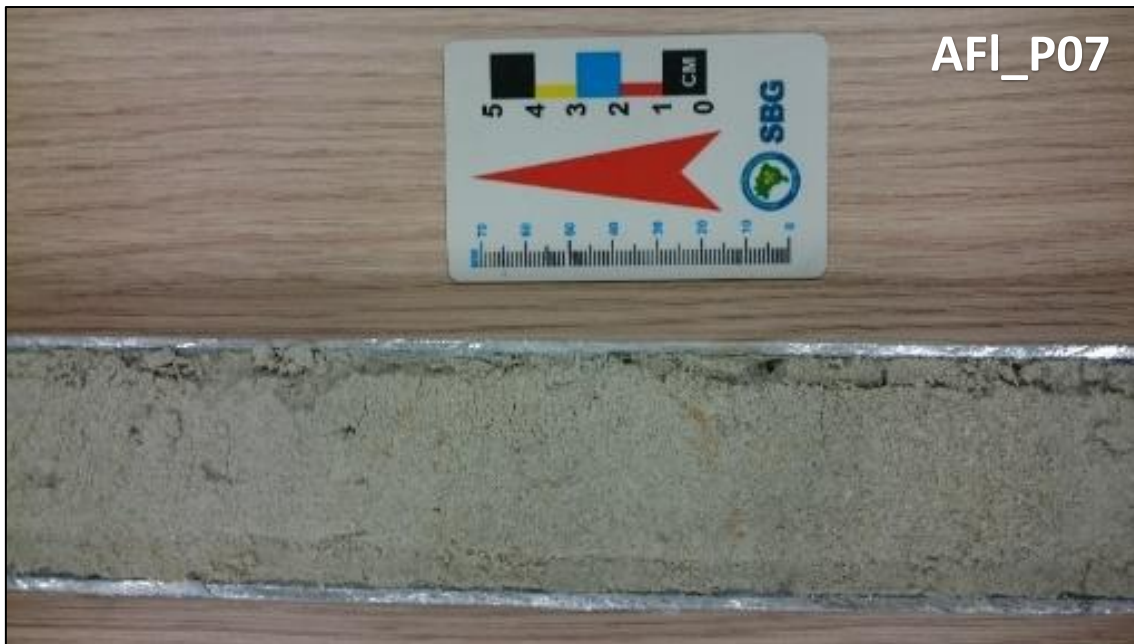


Figura 3.22: Amostra AFI_P07 com pequenas marcas de oxidação. Fonte: o autor.

Fácies AGb (Areia Grossa com Bioclastos)

Ocorrência: P02

A fácies AGb ocorre como uma areia grossa cinza-escuro de espessura de aproximadamente 56 cm, marcada pela presença abundante de fragmentos de conchas de bivalves (gênero *Ostrea*) e gastrópodes. Ocorrem desde fragmentos milimétricos até conchas centimétricas preservadas, onde normalmente as conchas de bivalves ocorrem desarticuladas e em níveis ligeiramente orientados em relação à estratificação. Em relação aos terrígenos, destacam-se grãos de minerais pesados não-magnéticos indeterminados. Esta fácies apresenta contato abrupto na base e ligeiramente gradacional no topo (Figura 3.23).



Figura 3.23: Amostra AGb_P02 com grande quantidade de fragmentos de conchas e bivalves, além de grãos de minerais pesados. Fonte: o autor.

Fácies AM (Areia Média)

Ocorrência: P02, P06

A fácies se apresenta como uma areia média com tonalidades que variam de cinza a castanho. Na região de transição entre as fácies AM_P02 e AGb_P02 ocorrem alguns bioclastos milimétricos predominantemente dispersos e ocasionalmente orientados segundo a estratificação, ao passo que a fácies AM_P06 apresenta, ocasionalmente, fragmentos de bioclastos e raízes de tamanho milimétrico (Figuras 3.24 e 3.25). Na porção superior da fácies AM_P02 ocorre ligeira diminuição da granulação (granodecrescência ascendente), exceto pela presença de minerais pesados dispersos ou ligeiramente concentrados. No mesmo local, ocorrem grãos de mica dispersos em pequenas quantidades.



Figura 3.24: Amostra AM_P02 com presença de minerais pesados dispersos (à esquerda) ou ligeiramente concentrados (à direita). Fonte: o autor.



Figura 3.25: Amostra AM_P06 com raras ocorrências de bioclastos e raízes. Fonte: o autor.

3.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica mostrou que o diâmetro médio das amostras varia de areia média a muito fina (2ϕ a 4ϕ), com as frações mais grossas sendo compostas de material bioclástico e raízes. Mesmo após o processo de elutriação, em algumas amostras foram observadas pequenas quantidades de silte-argila (amostras de fundo), mas que não

serão levadas em consideração devido a questões metodológicas. A tabela 3.2 exhibe as percentagens retidas em cada uma das peneiras no ensaio.

Tabela 3.2: Tabela de análise granulométrica (em gramas) de cada fácies descrita nos furos de testemunhagem. Fonte: o autor.

AMOSTRA	0Φ (g)	1Φ (g)	2Φ (g)	3Φ (g)	4Φ (g)	TOTAL (g)
AFr_P1	0,08	0,15	1,62	37,23	60,48	99,56
AFb_P1	0,09	0,68	6,96	54,29	37,24	99,26
AFI_P2	0,14	0,24	1,18	8,37	86,37	96,3
AGb_P2	10,62	62,76	41,41	1,37	1,04	117,2
AM_P2	3,90	24,77	9,52	8,26	52,43	98,88
AFb_P3	0,17	0,30	1,72	19,77	79,35	101,31
AFr_P3	0,15	0,22	0,64	21,47	76,81	99,29
AFr_P4	0,16	0,43	0,88	20,79	85,75	108,01
AFb_P4	0,14	0,26	2,00	23,00	74,18	99,58
AFr_P5	0,12	0,87	51,88	52,40	2,01	107,28
AFI_P6	0,47	0,90	6,49	31,43	67,56	106,85
AM_P6	0,30	9,37	62,31	18,07	17,14	107,19
AFI_P7	0,24	0,34	2,30	18,50	76,97	98,35
AFr_P7	0,22	0,65	2,74	22,30	72,51	98,42

3.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DAS ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

No que diz respeito à media, a maioria das amostras apresentaram-se entre $2,1\phi$ e $3,7\phi$ (areia fina a muito fina) com a amostra AGb_F2 apresentando um tamanho de areia média ($1,080\phi$) (Tabela 3.3). Em relação ao desvio padrão (grau de seleção), as amostras apresentaram-se com valores variando de, aproximadamente, $0,4\phi$ a $0,6\phi$ (moderadamente selecionadas), com as amostras AM_F2 e AM_F6 apresentando os valores $1,293\phi$ e $0,825\phi$ (enquadrando-se como pobremente selecionada e moderadamente selecionada, respectivamente). Em relação à assimetria, a maioria das amostras obteve a classificação de assimetria muito negativa a negativa, tendo variado em torno de $-0,5\phi$, com exceção das amostras AFb_P1, AGb_F2 e AM_F6, que foram classificadas como positivas a muito positivas e apresentaram os valores $0,220\phi$, $0,299\phi$ e $0,441\phi$ (Tabela 3.3), respectivamente.

Logo após, foi criado um gráfico de colunas que exhibe todas as variáveis de todas as amostras analisadas, de forma a compará-las de uma forma mais generalizada, tornando mais visível as variações entre os parâmetros estatísticos de todas as amostras (Figura 3.26). Este gráfico apenas reforça de forma simplificada o que já foi exposto na

Tabela 3.3, no entanto, aqui ficam mais evidente as mudanças entre as fácies de um mesmo ponto de coleta.

Tabela 3.3: Tabela de dados estatísticos das amostras de cada fácies. Fonte: o autor.

AMOSTRA	DIÂMETRO MÉDIO (ϕ)	DESVIO PADRÃO (ϕ)	ASSIMETRIA (ϕ)
Afr_P1	3,363	0,511	- 0,489
AFb_P1	3,069	0,625	0,220
AFI_P2	3,700	0,296	- 0,301
AGb_P2	0,723	1,033	- 0,203
AM_P2	2,684	1,299	- 0,765
AFb_P3	3,450	0,488	- 0,584
Afr_P3	3,458	0,471	- 0,567
Afr_P4	3,473	0,464	- 0,572
AFb_P4	3,433	0,491	- 0,567
Afr_P5	2,330	0,516	- 0,359
AFI_P6	3,355	0,640	- 0,611
AM_P6	2,125	0,824	0,438
AFI_P7	3,460	0,478	- 0,579
Afr_P7	3,425	0,499	- 0,571

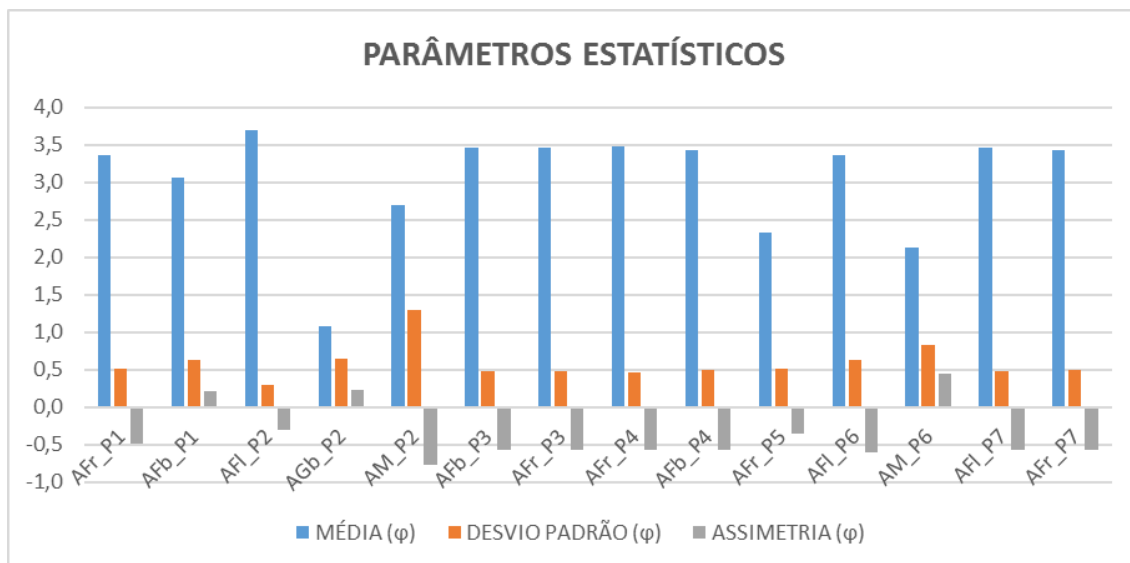


Figura 3.26: Gráfico de parâmetros estatísticos das amostras em questão. As colunas em azul indicam a média dos diâmetros de cada amostra, onde as barras maiores indicam uma maior presença de material mais fino, ao passo que as barras de menor tamanho indicam uma maior presença de material de diâmetro médio a grosso. Fonte: o autor.

Baseado no gráfico anterior, é possível fazer uma série de considerações:

- Em relação às fácies do ponto 1, houve um ligeiro aumento no diâmetro médio da amostra basal (AFb_P1) em relação à do topo (Afr_P1). O mesmo não acontece em relação ao desvio padrão, que se apresentou ligeiramente maior na

base (em comparação à camada do topo). Além disso, foi constatado a assimetria positiva da base, enquanto que o topo apresentou um caráter positivo;

- Em relação às amostras do ponto 2, é possível notar que a o diâmetro médio da fácies de base (AFI_P2) sofreu um aumento considerável no seu valor em relação à fácies de transição (AGb_P2), voltando a reduzir este valor em relação à fácies superior (AM_P2). Em relação ao desvio padrão, este apresentou um aumento gradativo da base para o topo. Quanto à assimetria, que apresentou um caráter negativo em todas as amostras deste ponto, a fácies basal sofreu um leve aumento em comparação com a fácies de transição, onde posteriormente sofreu um decréscimo considerável na fácies de topo;
- Em relação ao ponto 3, é possível observar que, do ponto de vista dos parâmetros estatísticos, as fácies são similares, com médias de diâmetro, desvio padrão e assimetria praticamente idênticos;
- No ponto 4 ocorre a mesma situação do ponto 3, com parâmetros estatísticos praticamente idênticos;
- No ponto 5 a ocorrência de uma única fácies dificulta a análise local, no entanto, estabelecendo uma comparação baseada na proximidade com as amostras dos pontos 3 e 4, é possível observar que houve um aumento no diâmetro médio e um aumento na assimetria. O valor de desvio padrão permaneceu praticamente o mesmo;
- No ponto 6 foi observada uma variação considerável do diâmetro médio, onde a amostra de base (AFI_P6) apresentou-se com um tamanho menor em relação à camada de topo (AM_P6). Foi observado um pequeno aumento do desvio padrão da fácies de base em comparação à fácies de topo. Além disso, também foi observada a inversão da assimetria entre as duas amostras, com a fácies de base apresentando caráter negativo e a fácies de topo apresentando caráter positivo;
- No ponto 7 foi observada a mesma situação das amostras dos pontos 3 e 4, com as fácies apresentando-se praticamente idênticas do ponto de vista estatístico.

Na etapa seguinte, foram confeccionados diagramas bi-variados entre os parâmetros estatísticos (diâmetro médio, desvio padrão e assimetria) de onde obteve-se uma série de interpretações.

O agrupamento de pontos entre as variáveis desvio padrão e diâmetro médio mostra que existe uma tendência de as fácies com diâmetro médio menor estarem mais

fortemente relacionadas a um desvio padrão de menor valor (alto grau de seleção), ao passo que as fácies de diâmetro médio maior não apresentam essa correlação de forma tão evidente. Assim, baseado na relação entre essas duas variáveis, é possível dizer que, nas fácies predominantemente compostas por areias mais finas, o mecanismo que controlou a deposição possuía uma baixa competência, denotando uma deposição com caráter lento e gradual. Para as fácies de diâmetro médio maior, é possível que o processo de deposição tenha ocorrido sob influência de um mecanismo de transporte de maior competência, onde provavelmente essa deposição ocorreu em um período de tempo mais curto.

O agrupamento de pontos entre as variáveis desvio padrão e assimetria mostra que existe uma tendência de as fácies com desvio padrão menor estarem relacionadas a uma assimetria negativa. Visto que a assimetria negativa é um indicador de ambiente deposicional praiial, é de se supor que as amostras do agrupamento de pontos tenham se depositado sob condições de influência hidrodinâmica limitada, ou sob influência de um sistema deposicional mais complexo. As amostras AFb_F1, AGb_F2 e AM_F6, por possuírem um caráter positivo para a sua assimetria, foram interpretadas como sendo mais fortemente influenciadas pelos canais de marés existentes atualmente ou no passado. Visto que a amostra AM_F2 reflete as condições de praia atual (assimetria negativa e desvio padrão alto), a hipótese acima para estas duas variáveis torna-se mais aceitável.

O agrupamento de pontos entre as variáveis diâmetro médio e assimetria mostra que existe uma tendência de as fácies com diâmetro médio menor estarem mais fortemente relacionadas a uma assimetria negativa. Esta relação confere a estas fácies um caráter policíclico, onde os sedimentos podem ter passado por mais de um estágio de retrabalhamento em relação à área fonte, tendo sido retrabalhadas a partir de antigas planícies costeiras. Para as fácies mais afastadas da nuvem de pontos, talvez este processo tenha ocorrido de forma diferente, possuindo maior similaridade com os sedimentos da área-fonte.

É muito provável que a aerodinâmica também tenha influenciado a deposição dos sedimentos analisados, visto que a área de estudo possui um extenso campo de dunas. No entanto, devido à dificuldade de observar estruturas deposicionais características deste tipo de ambiente nos testemunhos analisados, foi dado um foco maior nos processos relacionados ao ambiente marinho propriamente dito.

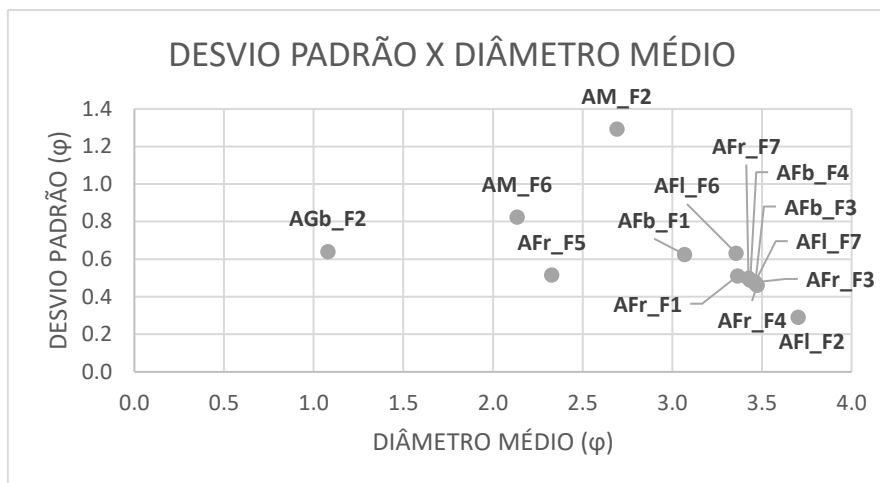


Figura 3.27: Gráfico entre o desvio padrão e o diâmetro médio, onde foi observada uma concentração de pontos no canto inferior direito do gráfico (em destaque). Fonte: o autor.

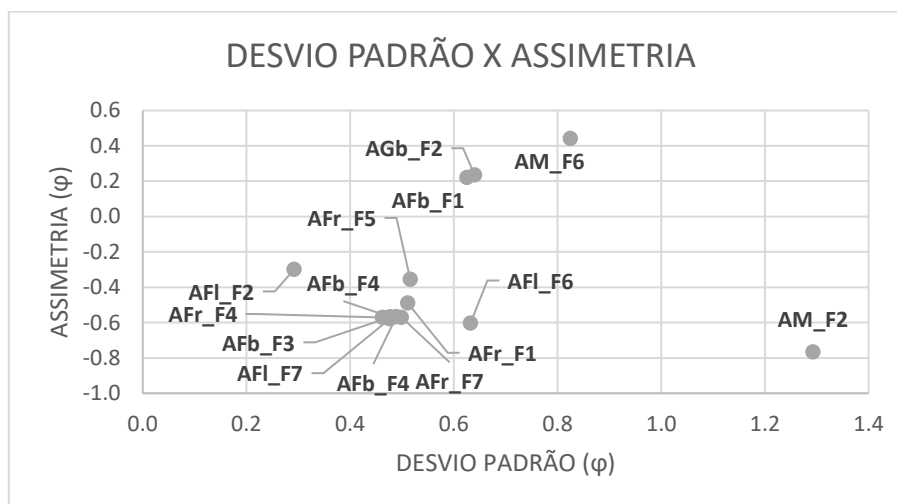


Figura 3.28: Gráfico entre o desvio padrão e a assimetria, onde foi observada uma concentração de pontos no canto inferior esquerdo do gráfico (em destaque). Fonte: o autor.

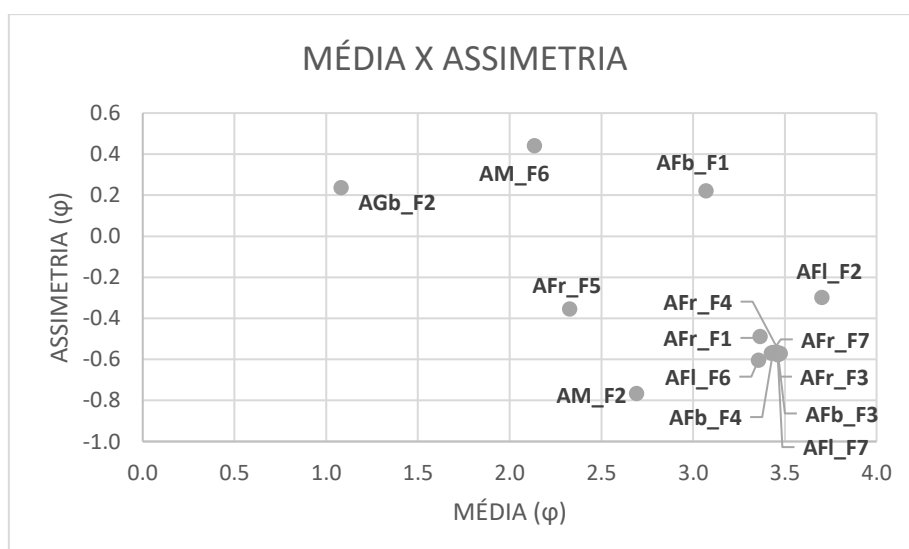


Figura 3.29: Gráfico entre o diâmetro médio e a assimetria, onde foi observada uma concentração de pontos no canto inferior direito do gráfico (em destaque). Fonte: o autor.

3.5 ANÁLISE DE PERFIS

A partir da localização dos pontos de coleta, foi possível estabelecer três perfis principais (Figura 3.30) que foram descritos segundo às correlações espaciais entre os furos. Assim, foram denominados, de acordo com o seu posicionamento em relação à área como um todo, os perfis: leste (F1 – F5), central (F4 – F3 – F2) e oeste (F7 – F6).



Figura 3.30: Disposição dos perfis de análise (em vermelho) seguindo a localização dos furos. Fonte: o autor

Perfil F7 – F6

A análise desse perfil mostra que há uma semelhança entre as porções basais dos dois furos (AFI_F7 e AFI_F6), no entanto, existem diferenças no que diz respeito ao contato na porção superior da fácies (Figura 3.31). No furo F7 existe uma mudança abrupta na coloração em relação à fácies superior, fato este que não ocorre no furo F6. Apesar disso, a continuidade lateral da camada parece evidenciada pelos dados de granulometria e pelos dados estatísticos obtidos. Em relação à fácies superior, houve uma mudança considerável na granulometria da fácies superior de F7 (AFr_F7) em relação a de F6 (AM_F6), tendo esta última uma granulação maior. Devido a estas diferenças, supõe-se que haja um contato (brusco ou gradacional) entre os dois locais analisados, o que justificaria essa mudança de tamanho médio de grãos.

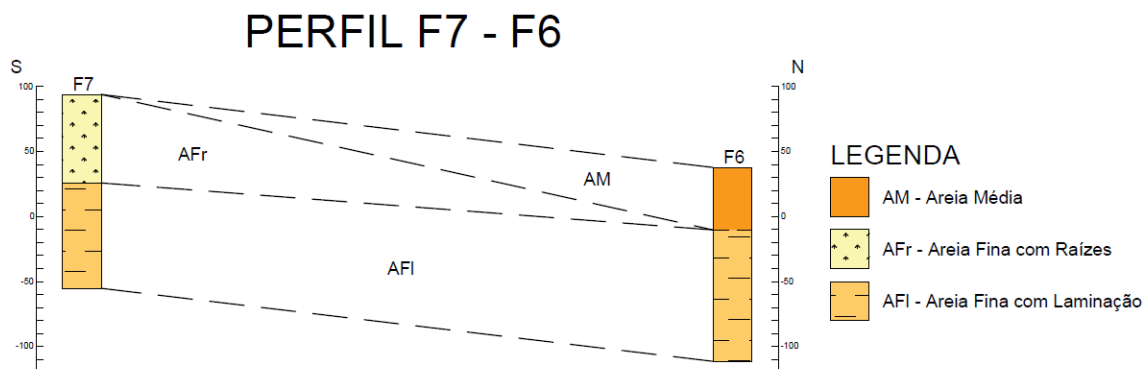


Figura 3.31: Perfil de análise F7 – F6 com a correlação lateral das fácies descritas em cada ponto. Fonte: o autor

Perfil F4 – F3 – F2

A análise deste perfil sugere uma complexidade maior do que os perfis adjacentes, possuindo uma variedade de fácies considerável (Figura 3.32). Partindo das fácies mais basais, ficou evidenciado a predominância de sedimentos de granulometria fina em todos os furos, onde as fácies AFb_F4 e AFb_F3 denotam a sua correlação através da presença de material bioclástico. Em relação aos rodolitos presentes nestas duas fácies, é interessante notar que, apesar de todos os indícios apontarem que se trata da mesma camada, existe uma diferença notável entre o tamanho dos rodolitos das duas fácies. Em relação à facies basal do furo mais a nordeste (AFI_F2), suas características descritivas impossibilitam a sua correlação com as outras fácies basais. Em relação às fácies superiores, podemos observar o mesmo padrão de ocorrência, com sedimentos finos nas fácies superiores dos dois furos a sudoeste (AFr_F4 e AFR_F3), e sedimentos mais grossos nas fácies do furo à nordeste (AGb_F2 e AM_F2).

Perfil F5 – F1

A análise deste perfil obteve resultados diferentes dos descritos no primeiro perfil, onde localmente não é possível observar a continuidade lateral das camadas devido a ocorrência de apenas uma fácies no furo à sudoeste (AFr_F5), ao passo que foi identificada uma fácies com bioclastos (AFb_F1) na porção basal do furo à nordeste (Figura 3.33). Isso pode ser atribuído às diferenças de cota altimétrica, que impossibilitam a visualização de uma possível continuidade da camada. Além disso, baseado nos dados de granulometria, a amostra AFR_F5, que foi caracterizada como uma areia fina, encontra-se com uma quantidade semelhante de sedimentos que seriam caracterizados como uma areia média.

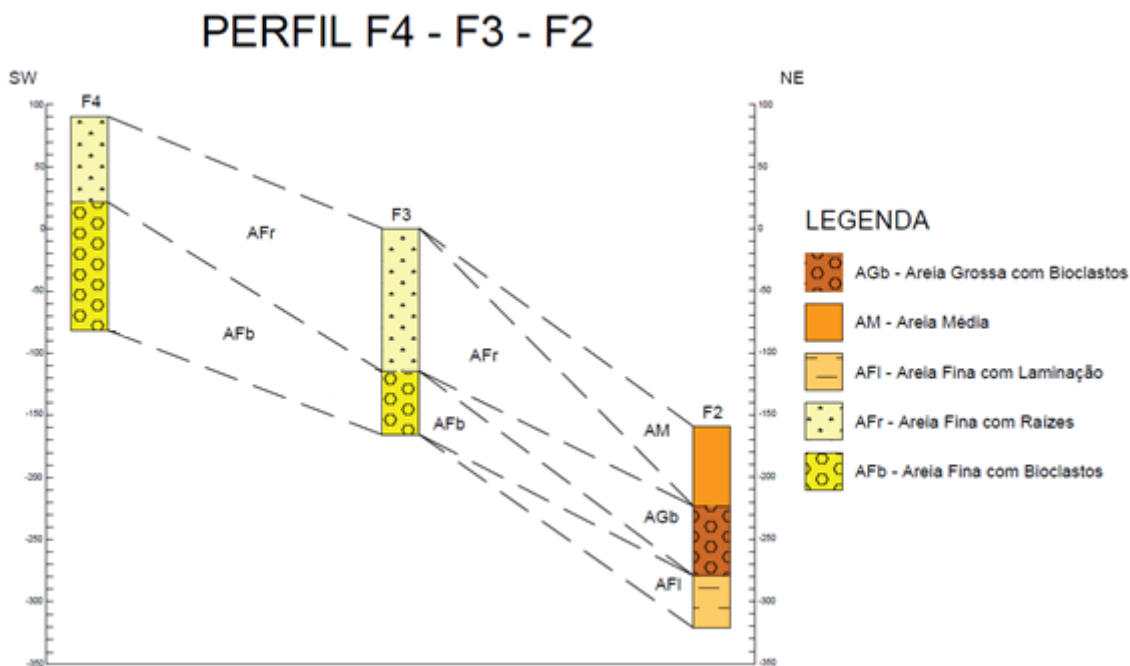


Figura 3.32: Perfil de análise F4 – F3 – F2 com a correlação lateral das fácies descritas em cada ponto.

Fonte: o autor

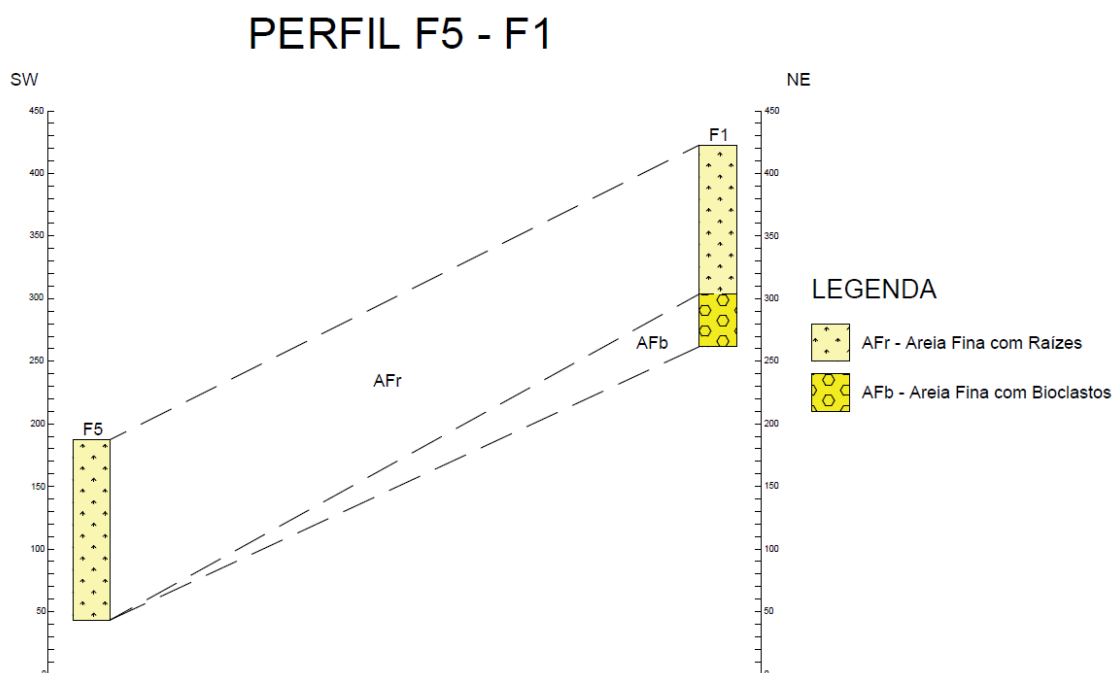


Figura 3.33: Perfil de análise F5 – F1 com a correlação lateral das fácies descritas em cada ponto. Fonte:

o autor

Após a descrição dos testemunhos, análise e tratamento estatístico dos dados granulométricos e interpretação dos perfis, foi possível elaborar uma tabela (Tabela 3.2) que permite a interpretação dos processos deposicionais, associação de fácies e possíveis características dos ambientes antigos existentes na região.

Tabela 3.2: Tabela geral das fácies identificadas, com seus respectivos processos deposicionais, associação de fácies e ambientes. Fonte: o autor.

PONTO	FÁCIES	DESCRIÇÃO	PROCESSO DEPOSICIONAL	ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES	AMBIENTE
F1	AFb	Areia fina com base indeterminada, fragmentos submilimétricos de conchas	Saltação	Dunas Eólicas	Eólico costeiro
	AFr	Areia fina com raízes apresentando contato gradacional na base e segregação granular micácea inclinada.	Saltação	Dunas Eólicas	
F2	AFI	Areia fina cinza com base indeterminada e laminação aparente plano-paralela ligeiramente deformada, marcada por segregação granular de grãos de mica.	Tração e suspensão alternadas com predomínio da primeira	Planície de Inter-maré	Planície de Maré
	AGb	Areia grossa cinza-escuro marcada pela presença abundante de fragmentos de bivalves em níveis ligeiramente orientados em relação à estratificação	Fluxo unidirecional subaquoso de alta energia	Canal de Maré (região de inframaré a submaré)	
	AM	Areia média com fragmentos de conchas milimétricos ocasionalmente orientados segundo a estratificação. Na porção superior ocorre ligeira diminuição da granulação	Fluxo unidirecional subaquoso de energia média	Canal de Maré (região de inframaré a submaré)	
F3	AFb	Areia fina com laminação aparente plano-paralela localizada e segregação granular de grãos de mica. Presença de rodolitos milimétricos orientados no sentido vertical.	Tração e suspensão alternadas com predomínio da primeira	Planície de Inter-maré	

	AFr	Areia fina marcada por uma acumulação de rodolitos, fragmentos de corais e de conchas de moluscos com tamanho centimétrico e fragmentos de raízes	Tração e suspensão alternadas com predomínio da primeira	Planície de Intermaré	
F4	AFb	Areia fina com fragmentos de conchas e fragmentos (ou vestígios) de raízes	Tração e suspensão alternadas com predomínio da primeira	Planície de Intermaré	
	AFr	Areia fina com grande quantidade de fragmentos e vestígios de raízes.	Tração e suspensão alternadas com predomínio da primeira	Planície de Intermaré	
F5	AFr	Areia fina com alguns fragmentos e marcas de raízes. Proporções equivalentes entre areia fina e média, com predomínio da primeira	Tração e suspensão alternadas	Planície de Intermaré	?
F6	AFI	Areia fina com contato gradacional no topo. Apresenta segregação granular de grãos de mica (biotita?) marcando uma provável laminação plano-paralela.	Tração e suspensão alternadas com predomínio da primeira	Planície de Intermaré	Planície de Maré / Litoral
	AM	Areia média com contato gradacional na base.	Tração e suspensão através de fluxo de <i>swash</i> e <i>backwash</i>	Face Litorânea	
F7	AFI	Areia fina com laminações aparentes, apresentando base indeterminada e contato brusco com a fácies subjacente.	Tração e suspensão alternadas com predomínio da primeira	Planície de Intermaré	
	AFr	Areia fina apresentando contato brusco com a fácies subjacente. Foram observados alguns fragmentos de raízes e grãos submilimétricos de micas.	Tração e suspensão alternadas com predomínio da primeira	Planície de Intermaré	

3.6 EVOLUÇÃO SEDIMENTAR

Baseado em todos os dados expostos nos capítulos anteriores, podem ser feitas uma série de observações a respeito dos antigos ambientes quaternários da área de estudo. Inicialmente, os dados mostram que existiu a deposição dos sedimentos pós-barreiras no que hoje corresponde a atual planície costeira do município de Icapuí, onde a hipótese levantada para a origem das barreiras é a da geração de sequências de *spits* progradantes lateralmente, sendo alimentados pela deposição de sedimentos que foram transportados de uma área-fonte à leste, provavelmente a foz do Rio Apodi-Mossoró.

Durante a observação, foi possível ver indícios da existência de diversas gerações de *spits*, sendo encerrados nas proximidades da região que hoje abriga os tanques de carcinicultura de Icapuí. As primeiras gerações, apesar dos poucos vestígios preservados, parecem se encerrar nas proximidades da sede do município. Os *spits* intermediários são parcialmente visíveis, principalmente as porções mais próximas à sede do município, formando um padrão de paleoilhas (antigos *spits*) que ocorrem principalmente na porção à oeste do atual canal de maré, o que leva a crer que em um dado momento essas estruturas estavam conectadas e foram truncadas pelo canal de maré, que deve ter sofrido uma ou mais mudanças de direção. Os *spits* mais recentes são os mais visíveis e de fácil identificação, sendo mais ou menos delimitados pelo banco de areia existente defronte ao atual *inlet* do canal de maré.

Devido ao posicionamento dos *spits*, do canal de maré e da região estuarina, existem indícios de um forte controle neotectônico na morfologia costeira da área de estudo, tanto no que diz respeito ao escalonamento do litoral setentrional nordestino, como também na morfologia da área de estudo, sendo esta a base para o crescimento dos *spits*. Existem indícios de que o estuário que existe atualmente em Icapuí é bastante antigo, visto que a forma que os *spits* se desenvolveram (interpretação baseada nas paleoilhas preservadas) evidencia um equilíbrio energético entre o ambiente estuarino e o desenvolvimento dos cordões.

Em relação à reativação neotectônica dos lineamentos, apesar da ausência de dados de datações e de geofísica rasa, foi possível obter alguns lineamentos interpretados a partir do trabalho de Sousa (2002), que sugere reativações tectônicas ao longo do quaternário.

Assim, foi possível definir uma sequência de eventos baseada na presença de paleoilhas, nas gerações de *spits* preservados e na presença de indícios que sugerem a mudança de posição dos canais de maré, que culminaram na formação da atual morfologia da planície costeira de Icapuí. A sugestão proposta para a evolução sedimentar da planície costeira segue a seguinte ordem cronológica (Figura 3.34):

- A sedimentação da planície costeira de Icapuí teve início a partir das falésias (Fm. Barreiras) localizadas no município de Tibau (1), formando um promontório cuja estrutura serviu de ancoragem para o desenvolvimento da primeira geração de *spits*, que foi alimentada pela deposição dos sedimentos transportados da foz do Rio Apodi-Mossoró.
- O avanço desse *spit* seguiu de sudeste para noroeste (2), de forma mais ou menos paralela à antiga linha de costa até alguma região próxima à sede do município de Icapuí, sendo a região retrobarreira ocupada pelas águas fluvio-marinhas e confluências das drenagens continentais. Esta hipótese é reforçada pela observação atual de paleoilhas com concavidade voltada para sudeste, e que hoje se encontram na região adjacente aos tanques de carcinicultura.
- Em um dado momento, o avanço dos *spits* cessa devido a diversos fatores: distanciamento da área-fonte e diminuição do aporte sedimentar; influência de um regime de marés de maior amplitude, promovendo o encurvamento da porção mais distal do *spit* (2); e influência da neotectônica, exercida pelos lineamentos da Fazenda Belém (sentido SW-NE), que agiriam como um barramento hidráulico para a corrente de deriva no sentido perpendicular (sentido SE-NW), dando origem ao que viria a se tornar um canal de maré (4). Esse grupo de *spits*, associados ao canal de maré, teriam servido de proteção para a agradaciação dos cordões litorâneos à sotamar do canal de maré (3).
- O processo agradacional promoveu a mudança no sentido do canal de maré que ocorria no sentido SE-NW (4), levando o fluxo cada vez mais para o sentido S-N (5), favorecendo o processo de rompimentos dos *spits* previamente formados. Essa conjunção de fatores associados compõe o atual sistema estuarino.

A partir deste ponto, parece haver uma estabilização do sistema, em conformidade com a morfologia atual do local.

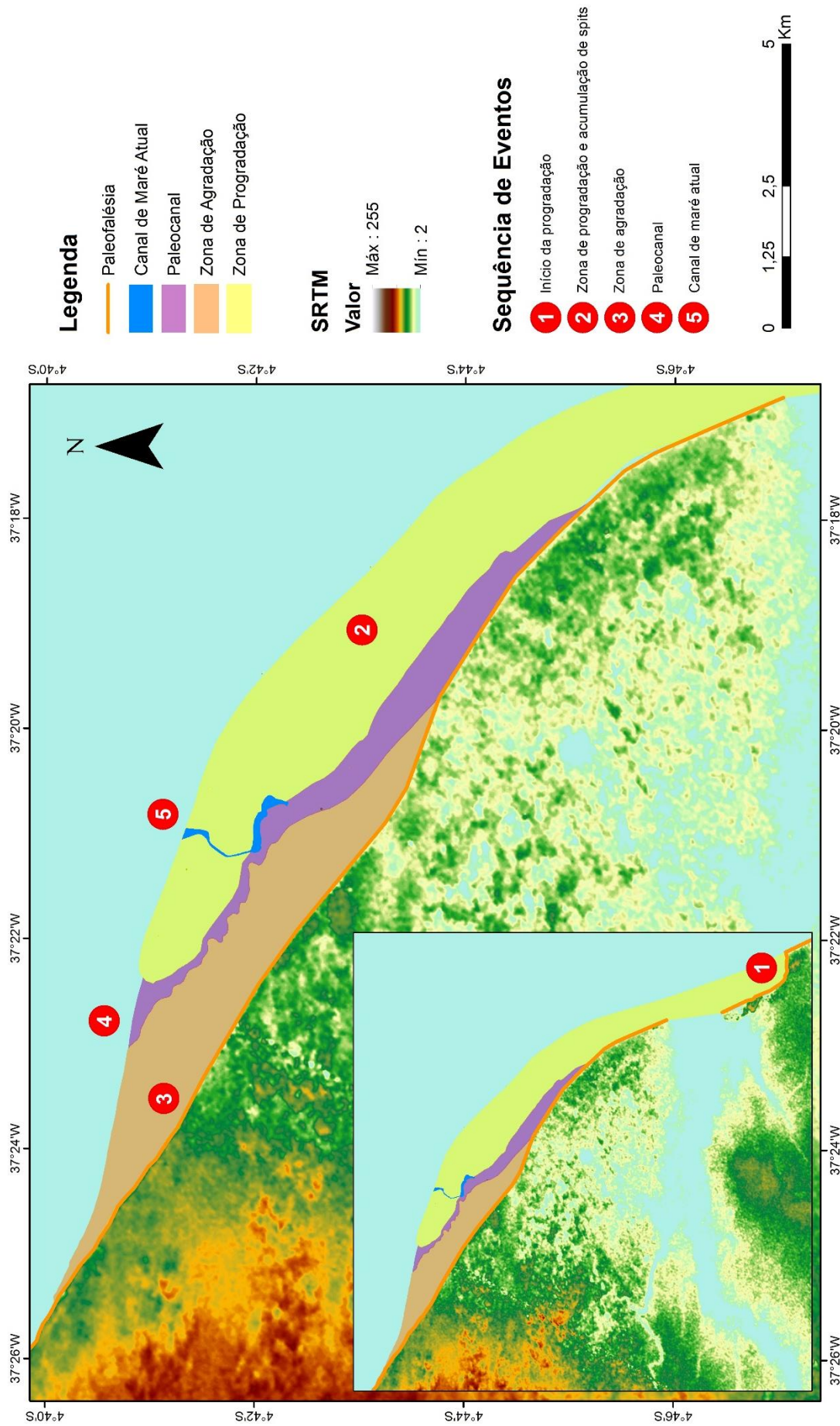


Figura 3.34: Sugestão para a evolução sedimentar da planície costeira de Icapuí, com base na interpretação do MDE da área. Fonte: o autor

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 CONCLUSÕES

A integração das metodologias aqui apresentadas foi fundamental para a caracterização da área de estudo e, por consequência, do sistema de planície costeira no trecho entre os municípios de Icapuí-CE e Tibau-RN, onde o sistema de falhas de Carnaubais e Afonso Bezerra corresponde à principal estrutura que controla a geometria da linha de costa e a deposição dos sedimentos costeiros. Em caráter local, a estruturação do sistema de lineamentos Ponta Grossa – Fazenda Belém atua através de reativações neotectônicas e soerguimento de blocos crustais nas adjacências da área de estudo. Atuando em conjunto, estas feições promovem um intenso controle estrutural neotectônico na evolução do sistema deposicional costeiro regional e local.

Em relação aos fatores de controle para a evolução do ambiente sedimentar, a ideia proposta é que a neotectônica, juntamente com a hidrodinâmica costeira, foram os fatores principais que influenciaram a deposição no local, onde o movimento de blocos crustais favoreceram a deposição através da diminuição do espaço de acomodação, além de gerar um efeito de barramento hidráulico nas adjacências dos lineamentos estruturais, dificultando a migração de sedimentos no sentido da corrente de deriva litorânea. Além disso, do ponto de vista regional, a neotectônica atuou na morfologia costeira, promovendo a geração de uma forma escalonada que controla a deposição sedimentar na linha de costa.

Primeiramente, o tratamento dos dados mostrou a necessidade de algumas adequações, em relação ao projeto inicial, para a compreensão dos processos costeiros da área de estudo, sendo necessária sua ampliação em etapas posteriores visando um melhor entendimento da área. No entanto, isso não invalida a qualidade do trabalho aqui apresentado, visto que a hipótese aqui levantada para a evolução costeira de Icapuí é pioneira no sentido de propor uma nova ideia de modelo de evolução da linha de costa para a região.

Em relação às técnicas de sensoriamento remoto e processamento digital de imagens, por possuírem uma resolução espacial elevada (para imagens distribuídas gratuitamente) e intervalos espectrais mais restritos na região do visível e do infravermelho de ondas curtas, as imagens Sentinel-2 foram eficientes em destacar as feições de interesse, facilitando a individualização das feições geomorfológicas costeiras

observadas na área de estudo. As técnicas de realce, filtragem e matemática de bandas empregadas nessas imagens, com destaque para a matemática de bandas do MNDWI, possibilitou o destaque de canais de maré submersos na região de planície de maré, denotando um controle estrutural na formação destas feições devido a ocorrência de canais de maré aproximadamente perpendiculares ao sentido da corrente de deriva litorânea. Este tipo incomum de disposição de canais de maré poderia ser um indício da influência neotectônica local.

A interpretação da evolução do sistema deposicional costeiro usando imagens SRTM e técnicas de realce e filtragem, baseando-se na ocorrência de um promontório na área de costa do município de Tibau-RN, foi determinante na interpretação da evolução da linha de costa das adjacências da área de estudo, tendo este promontório em Tibau-RN formado uma região protegida à sotacorrente e influenciado de forma direta a deposição dos sedimentos costeiros observados em Icapuí-CE. Além disso, as imagens SRTM da região entre as paleofalésias e o sistema de lineamentos Ponta Grossa – Fazenda Belém mostra um forte controle estrutural nos padrões de drenagens, que seguem dois *trends* preferenciais, aproximadamente nos sentidos noroeste-sudeste e oeste-leste. Foram observadas algumas drenagens que parecem recortar as paleofalésias, possivelmente influenciando na planície costeira observada, no entanto, devido à baixa preservação de drenagens em superfície, esta interpretação não será levada em consideração para a interpretação como um todo.

Juntamente com o sensoriamento remoto, a descrição de fácies foi definida como o principal referencial para o entendimento da evolução sedimentar da região, devido à confiabilidade atribuída a esses dados. Apesar das limitações inerentes à técnica de vibrotestemunhagem foi possível definir, mesmo que em caráter preliminar, um panorama da evolução sedimentar da região. Devido à falta de dados mais robustos como perfis geofísicos, datações por carbono 14 e dados de variação do NRM, não foi possível estabelecer um modelo de evolução sedimentar robusto para a área em questão, no entanto, os dados obtidos possibilitam a interpretação de alguns processos que têm ocorrido ao longo do quaternário superior na região.

Em relação à caracterização de fácies, os critérios para a definição de limites interfaciológicos de terceira e quarta ordem se mostraram bastante satisfatórios, permitindo a individualização de pelo menos 14 fácies, por vezes se tratando de uma mesma camada, distribuídas nos sete pontos de coleta. No que diz respeito a interpretação

dos dados, os parâmetros utilizados (granulometria e presença de estruturas e/ou “fósseis”) foram determinantes para o estudo, visto que são uma consequência dos processos e mecanismos controladores da deposição ali existente.

Durante o período em que as fácies foram descritas, foram observadas feições como: contatos gradacionais e bruscos, segregações granulares de minerais micáceos (marcando ou denotando a existência de laminações plano-paralelas), níveis oxidados (FeO) e níveis apresentando concentração de fragmentos de corais (rodolitos). A quantidade de informações referente às amostras coletadas não torna possível a construção de um modelo de evolução sedimentar robusto, mas permite uma interpretação preliminar das condições de deposição presentes na região.

No que diz respeito aos ensaios de análise granulométrica, foi evidenciado que os dados obtidos nesta etapa estavam de acordo com a descrição de fácies previamente realizada, cabendo apenas uma observação quanto à amostra AFr_F5, que apresentou uma quantidade mais ou menos equivalente de sedimento das frações retidas nas peneiras 2Φ (51,88 g) e 3Φ (52,40 g), o que permitiria caracterizar esta fácies como AMr_F5. Mesmo assim, optou-se por manter a descrição preliminar (AFr_F5) devido a maior quantidade de material fino.

Em relação ao tratamento estatístico dos dados granulométricos, a maioria das fácies classificadas foram definidas como areias finas a muito finas (baixa competência do agente transportador) moderadamente selecionadas (maturidade textural intermediária) e assimetria muito negativa a negativa (ambiente praiial), sugerindo um ambiente praiial relativamente calmo (perfil de praia dissipativo) com influência de processos fluviais nas proximidades do ponto F2. No entanto, o autor recomenda parcimônia no uso de estatística descritiva na interpretação dos dados, visto que, em alguns momentos, a interpretação estatística pode levar a equívocos na interpretação, fato este já abordado por diversos autores em outros artigos. Assim, deu-se uma maior importância à descrição de fácies.

Na porção a oeste, interpretada a partir do perfil F7 – F6, foi possível interpretar a ocorrência de uma continuidade lateral entre a porção basal dos dois furos, sugerindo que as fácies AFl_F7 e AFl_F6 fazem parte de um mesmo pacote. Essa interpretação é reforçada pela distribuição granulométrica entre as duas amostras. Nas porções superiores destes furos, ocorrem diferenças consideráveis entre AFr_F7 e AM_F6, tanto no que diz

respeito à sua relação de contato com a fácies inferior, como também em relação às diferenças granulométricas das duas fácies.

A fácies AFr_F7 apresenta uma mudança brusca na sua coloração em relação à fácies AFl_F7, sugerindo uma mudança de uma condição de ambiente oxidante (marinho) para um ambiente redutor (estuarino), fato que é reforçado pela presença de um fragmento centimétrico de rodolito na fácies AFl_F7, sendo gradualmente substituído por fragmentos e vestígios de raízes na fácies AFr_F7. Apesar de mudanças de coloração não serem consideradas parâmetros de descrição de fácies, este tipo de contato foi levado em consideração devido à sua relevância na interpretação paleoambiental, sugerindo que a aggradação que ali ocorreu promoveu a mudança do sentido do fluxo de um antigo canal de maré, o que poderia ter restringido o acesso de águas de origem marinha no local, criando uma condição com predominância de águas estuarinas saturadas em matéria orgânica, o que explicaria a mudança abrupta de coloração. Em relação ao ponto F6, tendo em vista que a AFl_F6 apresenta um tamanho médio de grãos consideravelmente menor do que AM_F6 e tendo suas relações de contato um caráter gradacional, sugere-se que tenha havido uma mudança gradual do ambiente deposicional como consequência das variações do NRM.

Assim, baseado nos dados para o perfil F7 – F6, temos indícios da ocorrência de um antigo ambiente estuarino nas imediações do ponto F7, ao passo que o ambiente do ponto F6 seria mais semelhante ao de um ambiente praial, ou predominantemente influenciado pelos processos costeiros. Um fator que pesa negativamente é a ausência de uma estrutura que indique claramente um paleocanal no entorno da área do perfil, no entanto, os dados atuais têm caráter sugestivo, não impedindo que posteriormente sejam identificadas novas evidências para dar suporte a essa ideia.

Em relação ao perfil F4 – F3 – F2, pode-se dizer que este foi considerado o perfil mais complexo do ponto de vista de interpretação, visto que apresenta uma diversidade elevada de fácies e de estruturas preservadas. Para facilitar a interpretação deste perfil, os pontos F3 e F4 serão interpretados separadamente do ponto F2, já que apresentam diferenças muito grandes de fácies e de estruturas.

Os furos F3 e F4, devido a sua proximidade espacial, parecem representar uma mesma sequência de fácies, também devido às suas características granulométricas serem bastante similares. Existe uma pequena diferença de tamanho entre os rodolitos das fácies

AFb_F3 e AFb_F4, sendo os fragmentos da primeira fácies de tamanho maior e estando os níveis bioclásticos bem marcados em cotas bastante similares.

Do ponto de vista de interpretação de paleoambientes, os rodolitos observados sugerem que tenha havido também neste local uma influência de marés em um processo similar ao que ocorreu na região do furo F7, já que no furo F4 foi observado uma mudança similar de coloração, no entanto, neste ponto houve uma gradação de um sedimento mais claro (marinho) para um mais escuro (estuarino), sugerindo o mesmo processo de mudança de ambiente oxidante para redutor do furo F7.

No setor mais a nordeste, o furo F2 se apresenta como sendo oriundo de processos deposicionais bem diferentes dos outros furos. Primeiramente, na sua base foi observada uma fácies AF1_F2 que apresenta contato brusco com a fácies superior (AGb_P2). Devido a essa mudança brusca, foi levantada a hipótese de que, nas imediações do ponto, houve um processo de migração de canal de maré, que possibilitou a deposição de sedimentos de diâmetro médio maior e dos fragmentos de conchas de bivalves e gastrópodes. Seguindo em direção ao topo da camada, o contato gradacional com a fácies AM_F2 sugere que houve uma redução na energia do sistema que controlava a deposição, dando a entender que houve um processo de assoreamento do canal de maré.

No setor mais a leste, o perfil F5 – F1 se destaca dos outros por possuir um caráter de ambiente predominantemente eólico, sendo esta interpretação reforçada pela granulometria das fácies do furo F1. Apesar disso, algumas ideias ainda precisam ser discutidas, como a influência marinha sugerida pela granulometria da fácies AFr_F5, que apresentou grande quantidade de sedimentos da fração areia média. Visto que este é um dos pontos mais distantes da linha de costa dentre todos os pontos analisados, e sendo os ambientes deposicionais com sedimentos de diâmetro maior normalmente associados aos agentes transportadores de maior competência, isso representa um processo que ainda não foi compreendido e talvez necessite de mais dados para uma interpretação mais assertiva.

Outra questão que ainda não ficou muito bem esclarecida foi a origem do sistema estuarino existente no local. A existência de estuários pressupõe a existência de um rio associado, no entanto, isso não ocorre em Icapuí. Então, para preencher essa lacuna, foi proposto um modelo que explica o fornecimento de água doce ao estuário através de águas subterrâneas. Essa ideia necessita de estudos mais detalhados, no entanto, até o momento, é o único modelo que torna possível a manutenção de um estuário na região.

4.2 RECOMENDAÇÕES

Para que seja possível uma análise mais criteriosa da evolução sedimentar da área de estudo, o autor recomenda a obtenção de perfis geofísicos (pelo menos 3) na porção a leste, central e oeste da planície costeira, por meio de uso de equipamentos de geofísica rasa (3, 5 ou 10 m) ou mesmo mais profunda (20, 30 ou 50 m) para melhor avaliar esta hipótese aqui levantada

Além disso, seria importante a obtenção de dados de datação de carbono 14 em bioclastos para obtenção de informações mais detalhadas referentes à sequência de eventos deposicionais e de processos relacionados à variação do NRM na região. Existe a intenção, por parte das pessoas envolvidas neste trabalho, em dar continuidade aos estudos na área, visto que existem muitas lacunas na interpretação da evolução sedimentar da área, e que viriam a ser discutidas em uma tese de doutorado.

REFERÊNCIAS

- ANDERTON, R. Clastic facies models and facies analysis. *In*: P. J. BRENCHLEY, B. P. J. WILLIAMS (Eds.), **Recent developments and applied aspects**, 1985. p. 31-47. Oxford: Blackwell Scientific.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. 1ª ed. Rio Grande do Sul: Editora Unisinos. 2003. 165 p.
- ANGELIM, L.A.A., MEDEIROS, V.C., NESI, J.R. Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Norte. **Programa Geologia do Brasil – PGB. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte**. Recife: CPRM/FAPERNA, 2006. 1mapa color., 130 cm x 91 cm. Escala. 1:500.000. Disponível em: <http://geobank.cprm.gov.br/pls/publico/geobank.documents.download?id_sessao=20150818130340&usuario=1&file=riograndedonorte_lito.zip>. Acesso em: 31 de outubro de 2016
- ARAI, M. A grande elevação eustática do Mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. **Geologia USP: Série Científica**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 1-6, 2006.
- ARAÚJO, V. D.; REYES-PERES, Y. A.; LIMA, R. O.; PELOSI, A. P. M. R.; MENEZES, L.; CÓRDOBA, V. C.; LIMA-FILHO, F. P. Fácies e sistema deposicional da formação Barreiras na Região da Barreira do Inferno, litoral Oriental do Rio Grande do Norte. **Geologia USP: Série Científica**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 43-9, 2006.
- BARRETO, A. M. F.; BEZERRA, F.H.R.; SUGUIO, K.; TATUMI, S.H.; YEE, M.; PAIVA, R.P.; MUNTA, C. S. Late Pleistocene marine terrace deposits in northeastern Brazil: sea-level changes and tectonic implications. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 179, p. 57-69, 2002.
- BARROS, S. D. S. **Flutuação do nível relativo do mar no litoral do Ceará, Nordeste do Brasil durante o holoceno: evidências isotópicas de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) em beachrocks**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-graduação em Geociências, 2005.
- BEHLING, H; COHEN, M. C. L.; LARA, R. J. Studies on Holocene mangrove ecosystem dynamics of the Bragança Peninsula in north-eastern Pará, Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 167, n. 3, p. 225-242, 2001.

BERTANI, R. T.; COSTA, I. G.; MATOS, R. M. D. Evolução Tectono-sedimentar Estilo Estrutural e Habitat do Petróleo da Bacia Potiguar. *In*: RAJA GABAGLIA GP & MILANI E. J. Ed. **Origem e evolução de bacias sedimentares**. PETROBRAS, Rio de Janeiro, p. 291–301, 1990.

BEZERRA, F. H. R. **Neotectonics in Northeastern Brazil**. 208 f. Thesis (Doctor Philosophy) - University College London, London. 1998

BEZERRA, F. H. R.; BARRETO, A. M. F.; SUGUIO, K. Holocene sea-level history on the Rio Grande do Norte State coast, Brazil. **Marine Geology** (Print), Holanda, v. 196, n.1-2, p. 73-89, 2003.

BEZERRA, F. H. R.; LIMA-FILHO, F. P.; AMARAL, R. F.; CALDAS, L. H. O.; COSTA-NETO, L. X. Holocene coastal tectonics in NE Brazil. *In*: STEWART, I.; VITA-FINZI, C. (eds), **Coastal Tectonics**, Geol. Soc. London Spec. Pub., v. 146, p. 279-293, 1998.

BEZERRA, F. H. R.; VITAFINZI, C. How active is a passive margin? Paleoseismicity in northeastern Brazil. **Geology**, Boulder, CO, v. 28, p. 591-594, 2000.

BIRD, E. C. Barrier. *In*: SCHWARTZ M. L. (ed) **Encyclopedia of coastal science**. Springer, Berlin, pp 119–120. 2005.

BIRD, E. C. **Coastal geomorphology: an introduction**. 2ª ed. New York: John Wiley & Sons, 2008. 436 p.

BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**. Brasília, DF: CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 2008.

BORGHI, L. **Visão geral da análise de fácies sedimentares do ponto de vista da arquitetura deposicional**. Rio de Janeiro, Museu Nacional, 26 p. (Boletim, Nova Série, Geologia, v. 53), 2000.

BOSKI, T.; BEZERRA, F. H. R.; PEREIRA, L.; LIMA-FILHO, F. P.; MAIA, R. P.; PAULINO, A. C. S.; GOMES, A. I. 2011. Registo da subida pós-glacial do nível do mar no estuário do rio Potengi, RN, Brasil. *In*: XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA) e III Encontro do Quaternário Sulamericano, 2011, Búzios. Anais... Búzios: ABEQUA, 2011.

- BROCHADO, G.T. Atenuação do efeito do desflorestamento em dados SRTM por meio de diferentes técnicas de interpolação. 2015. 113p. (sid.inpe.br/mtcm21b/2015/02.06.18.12-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015. Disponível em <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3HT5JCL>. Acessado em: outubro de 2017.
- CALDAS, L. H. O. Estudo geológico e geofísico da falha de carnaubais, Bacia Potiguar-RN, e implicações neotectônicas. 1998. 102 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica; Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1998.
- STATTEGGER, K., CALDAS, L. H. O., VITAL, H. Holocene sea-level history: Evidence from coastal sediments of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil. **Marine Geology**, v. 228 (1-4), p. 39-53, 2006.
- CAMPOS SILVA, A. Contribuição ao estudo do Grupo Barreiras no Rio Grande do Norte. **Coleção Mossoroense**: Mossoró, Série B, n.391, 14pp, 1983.
- CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais**. Ed. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba, 2004.
- COHEN, M. C. L.; SOUZA FILHO, P. W. M., LARA, R. J.; BEHLING, H.; ANGULO, R. J. A model of Holocene mangrove development and relative sea-level changes on the Bragança Peninsula (northern Brazil). **Wetlands Ecology and Management**, v. 13, n. 4, p. 433-443, 2005.
- COLLINSON, J. D. The sedimentology of the Grindslow Shales and the Kinderscout Grit: a deltaic complex in the Namurian of northern England. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 39, p. 194-221, 1969.
- CROSS, T.A.; HOMEWOOD, P.W. Amant Gressly's role in founding modern stratigraphy. **Geological Society of America Bulletin**, v. 109 (12), p. 1617-1630, 1997.
- CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto** - ed. rev. - Campinas, SP: IG/UNICAMP, 170p, 1992.
- DAIDU, F. Open-Coast Tidal Flats. **Principles of Tidal Sedimentology**. p. 187-229, 2012.

DAVIS JR., R. A. **Geology of Holocene barrier island systems**. Springer Science & Business Media, 2012.

DAVIS JR., R. A.; FITZGERALD, D.M. **Beaches and Coasts**. 1ª ed. Blackwell Publishing, 2004, 419p.

DAVIS, R. A.; HAYES, M. O. What is a wave-dominated coast? **Marine Geology**, v. 60, p. 313–329, 1984.

DIAS, J. A. **A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos (Uma Introdução à Oceanografia Geológica)**. Universidade do Algarve, UALg, 84p. 2004. E-book disponível em: http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/eb_Sediment.html. Acesso em 05/12/2016

DILLENBURG, S. R.; HESP, P. A. **Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil**. Springer, 2008.

DUANE, D.B. Significance of skewness in recent sediments, Western Pamlico Sound, North Carolina. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 34: p. 864-874, 1964.

ETCHEBEHERE M. L.; SAAD A. R. Fácies e associações de fácies em depósitos neokuaternários de terraço na bacia do rio do Peixe, região ocidental paulista. São Paulo. UNESP. **Geociências**, v. 22(1), p. 5-16, 2003.

FARIAS, P. R. C. Geologia de Superfície da Área de Macau-RN. (**Relatório Final Petrobrás**), GEXP, GELAB, 76 p., 1997.

FEAGIN, R. A.; YEAGER, K. M.; BRUNNER, C. A., PAINE, J. G. Active fault motion in a coastal wetland: Matagorda, Texas. **Geomorphology**, v. 199, p. 150-159, 2013.

FERREIRA JÚNIOR, P. D.; CASTRO, P.T.A. Associação vertical de fácies e análise de elementos arquiteturais: concepções concorrentes e complementares na caracterização de ambientes aluviais. **Revista Electrónica de Ciências da Terra**, Lisboa, 2001. v. 1(1) p. 1-35, 2001.

FOLK, R. L., WARD, W. C. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 27, p. 3-26, 1957.

FONSECA, L. M. G. Processamento Digital de Imagens. **Notas de aulas da disciplina de PDI nos programas de pós-graduação dos cursos de Sensoriamento Remoto e Computação Aplicada**. INPE, V. 6: pag 72-90, 2000.

FRAZÃO, E. P. **Caracterização Hidrodinâmica e Morfo-sedimentar do Estuário Potengi e áreas adjacentes: subsídio para controle e recuperação ambiental no caso de derrames de hidrocarbonetos**. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, p. 88-125. 2003

FRIEDMAN, G. M. Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 31, p. 514-529, 1961.

FRIEDMAN, G. M. Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 37, p. 327-354, 1967.

HESP, P. A.; MAIA, L. P.; CLAUDINO-SALES, V. The Holocene barriers of Maranhão, Piauí and Ceará States, Northeastern Brazil. In: DILLENBURG, S. R.; HESP, P. A. (Ed.). **Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil**. Berlin: Springer, 2009. p. 93-134.

INQUA (INTERNATIONAL UNION FOR QUATERNARY SCIENCE). Commission on stratigraphy and chronology (INQUA-SACCOM). 2014. Disponível em: <<http://www.inqua-saccomm.org>> Acesso em: 09 ago. 2017.

KENNEDY, D. M. Tectonic and geomorphic evolution of estuaries and coasts. In Wolanski, E., and McLusky, D. (eds.), **Treatise on Estuarine and Coastal Science**. Oxford: Elsevier, pp. 37–59, 2011.

KING, C.A.M., **Beaches and Coasts**. London, Edward Arnold, 2° ed, 570 p, 1972.

KOMAR, P.D. **Beach Processes and Sedimentation**. Englewood Cliffs, Nova Jersey: Prentice-Hall, 544 p., 1998.

KRUMBEIN, W. C. Application of Logarithmic Moments to Size Frequency Distributions of sediments. **Society for Sedimentary Geology**, v. 6, p. 1527-1404 1936

LIMA, F. J. **Evolução geomorfológica e reconstrução paleoambiental do setor subúmido do Planalto Sedimentar do Araripe: um estudo a partir dos depósitos**

- coluviais localizados nos municípios de Crato e Barbalha – Ceará.** 2015. 192 p. Tese (Universidade Federal de Pernambuco, CFCH. Programa de Pós-Graduação em Geografia), 2015.
- LIMA, M. G. **A história do intemperismo na província Borborema Oriental, Nordeste do Brasil: implicações paleoclimáticas e tectônicas.** 2008. 251 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- MARINO, M. T. R. D.; FREIRE, G. S. S. Análise da evolução da linha de costa entre as Praias do Futuro e Porto das Dunas, Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), estado do Ceará, Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 13(1): p. 113-129, 2013.
- MARTINS, L. R. Recent Sediments and Grain size analysis: **Revista Gravel**, Porto Alegre, v. 1, p. 90-105, 2003.
- MARTINS, L. R. Significance of skewness and kurtosis in environmental interpretation. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 35 (1), p. 768-770, 1965.
- MEIRELES, A. J. A. **Mapeamento Geológico - Geomorfológico do Quaternário Costeiro de Icapuí – Extremo Leste do Estado do Ceará.** 133 p. 1991. Dissertação (Universidade Federal de Pernambuco). 1991.
- MEIRELES, A. J. A.; ARRUDA, M. G. C.; GORAYEB, A.; THIERS, P. R. L. Integração dos indicadores geoambientais de flutuação do nível relativo do mar e de mudanças climáticas no litoral cearense. **Mercator**, v. 8, p. 109-134, 2005.
- MELO, F. T. L. **Aspectos morfodinâmicos do complexo lagunar Nísia Floresta – Papeba – Guarairas, região costeira sul oriental do RN.** 2000. 118 p. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica; Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2000.
- MESQUITA, A. F. **Eolianitos e beachrocks no litoral oeste do Ceará: significado sedimentológico e neotectônico.** Fortaleza, 79 p. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Recursos Minerais). Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2015.
- MIALL, A.D. - **The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology.** Springer Verlag; 582p. 1996.

- MIRANDA, I. G. **Caracterização dos sistemas de barreiras arenosas do litoral do Ceará**. 54 p. 2017. Monografia (Graduação) - LABOMAR, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- MORAIS, J. O.; FREIRE, G. S. S.; PINHEIRO, L. S.; SOUZA, M. J. N.; CARVALHO, A. M.; PESSOA, P. R. S.; OLIVEIRA, S. H. M. Ceará. In: MUEHE, D. **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. p. 133-154. 2006.
- MUEHE, D., Geomorfologia Costeira. In: **Geomorfologia - Exercícios, Técnicas e Aplicações**, GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B., v. 2, Bertrand Brasil, p. 191-238, 1996
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2. ed. Edgard Blücher: São Paulo, 1992. 308 p.
- OLIVEIRA, M. M. N. Aspectos morfológicos e sedimentares associados à dinâmica do Litoral Oeste de Icapuí, Ceará. 188 p. 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2012.
- OTVOS, E. G. Coastal barriers – Nomenclature, processes and classification issues. **Geomorphology**, v. 139-140, p. 39-52. 2012.
- OTVOS, E. G. Beach ridges – definitions and significance. **Geomorphology** v. 32, p. 83-108. 2000
- PESSOA NETO, O. C.; SOARES, U. M.; SILVA, J. G. F.; ROESNER, E. H.; FLORENCIO, C. P.; SOUZA, C. A. V. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 357-369, maio/nov. 2007
- PEULVAST, J. P.; CLAUDINO-SALES, V. Formas Litorâneas: Barreiras no litoral do estado do Ceará, Nordeste do Brasil. In: SILVA, J. B. da et al . (Org.). Litoral e sertão, natureza e sociedade no nordeste brasileiro. Fortaleza: Expressão Gráfica, 2006. p. 383-389.
- PINHO, C. M. D.; RENNÓ, C. D.; KUX, H. J. H. Avaliação de Técnicas de Fusão Aplicadas à Imagem Quickbird. **Anais... XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil. INPE, p. 4225-4232, 2005.

READING, H. G. **Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy.**

Blackwell Publishing. 688 p. 1996.

REY, J.; FUMANAL, M. P. The Valencian coast (western Mediterranean): neotectonics and geomorphology. **Quaternary Science Reviews**, v. 15, n. 8, p. 789-802, 1996.

RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis: an introduction.**

Fourth Edition. New York: Springer Verlag, 431p., 2006.

RIOS, V. P. L. Caracterização dos Depósitos Sedimentares Holocênicos no Sistema de Ilhas Barreiras do Estuário Diogo Lopes, Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte.

123 p. 2011. Monografia (Graduação) - Centro de Ciência Exatas e da Terra,

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

RIOS, V. P. L. Reativação tectônica e arquitetura deposicional do sistema de ilhas

barreiras da Bacia Potiguar. 150 f. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência e

Engenharia do Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Centro de

Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia do

Petróleo – Natal, RN, 2015.

RIOS, V. P. L.; AMARO, V. E. Caracterização dos Depósitos Sedimentares

Holocênicos no Sistema de Ilhas Barreiras do Estuário Diogo Lopes, Litoral

Setentrional do Rio Grande do Norte. *Revista de Geologia*, v.25, n.esp, 2012.

ROCKETT, G. C. Sensoriamento Remoto e Georradar aplicados à Caracterização de Sistemas Depositionais Eólicos Costeiros (Uma Revisão). **Gravel** v. 12 (1) p. 15-39.

Porto Alegre, 2014.

ROSSETTI, D. F. Evolução Sedimentar Miocênica nos Estados do Pará e Maranhão.

Geologia USP: Série Científica, São Paulo, v. 6, p. 7-18, 2006.

SALGADO-LABORIAU, M. L. **História Ecológica da Terra.** São Paulo: E. Bücher,

1994

SALGADO-LABOURIAU M. L. **Crítérios e técnicas para o Quaternário.** São Paulo:

Edgar Blücher 387 p., 2007.

SANT'ANNA, J. L.; NERY, J. T. Variabilidade e Mudanças Climáticas no Brasil e seus

Impactos Regionais. In: SOUZA *et al.* (org). *Quaternário do Brasil.* São Paulo: Holos,

2005. cap.2, p.28-50.

SELLEY, R.C. **Ancient Sedimentary Environments**. London, Chapman and Hall, 287p, 1978.

SILVA FILHO, W. F. **Domínios morfoestruturais da plataforma continental do Estado do Ceará**. Porto Alegre, 288 p., Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

SILVA, A. C. Considerações sobre o quaternário do Rio Grande do Norte. **Arq. Inst. Antropol.** – Natal, UFRN, v.2, n. 1, p. 275-301, 1966.

SILVA, C. G. **Holocene stratigraphy and evolution of the Açu river delta, Rio Grande do Norte state, Northeastern Brazil**. 400 p. 1991. PhD Thesis (Duke University, Durham), 1991.

SILVA, R. L. C.; NOGUEIRA, A. M. B. Estratigrafia da porção emersa da costa do Rio Grande do Norte. **Anais...1º Simpósio sobre Processos Sedimentares e Problemas Ambientais na Zona Costeira Nordeste do Brasil (Recife, Pernambuco, Brazil)**, pp. 144–147. SILVA, A. C. – 1966 – Considerações sobre o Quaternário do Rio Grande do Norte. UFRN, Natal, *Arq. Inst. Antropol.* 2(1/2): 275-301, 1995.

SOARES, A. M. L.; LEITE, F. R. B.; LEMOS, J. J. S.; MARTINS, M. L. R.; MAYORGA, R. D.; OLIVEIRA, V. P. V. Áreas degradadas susceptíveis aos processos de desertificação no estado do Ceará – Brasil. In: Conferência Internacional sobre Impactos de Variações Climáticas e Desenvolvimento Sustentável em Regiões Semi-Áridas – ICID, 1992, Fortaleza/CE. *Anais. Fortaleza: ICID*, p.1-24. 1992.

SOUTO, M. V. S. **Análise da evolução costeira do litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, região sob influência da indústria petrolífera**. 2009. 177 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica; Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SOUZA, M. J. N.; MARTINS, M. L. R.; GRANJEIRO, C. M. M.; SOARES, M. Z. Esboço do Zoneamento Geoambiental do Ceará. In: **Projeto Áridas do Ceará. Grupo I – Recursos Naturais e Meio Ambiente**, v. 2 SEPLAN/FUNCEME. Fortaleza. p. 186-203, 1994.

SOUZA FILHO, P. W. M.; MARTINS, E. S. F.; DA COSTA, F. R. Using mangroves as a geological indicator of coastal changes in the Bragança macrotidal flat, Brazilian

Amazon: a remote sensing data approach. **Ocean & Coastal Management**, v. 49, n. 7, p. 462-475, 2006.

STATTEGGER T. K.; CALDAS L. H. O; VITAL. H. Holocene Coastal Evolution of the Northern Rio Grande do Norte Coast, NE, Brazil. **Journal of Coastal Research**, SI 39 Proceedings of the 8th International Coastal Symposium. Itajaí, SC, p. 150-155, 2006.

SUGUIO, K.; MARTIN, L. The role of neotectonics in the evolution of the Brazilian coast. **Geonomos**, Belo Horizonte, MG, v. 4, p. 45-53, 1996.

SUGUIO, K.; SALLUN, A. E. M.. Geologia do Quaternário e Geologia Ambiental. In: Mantesso Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito Neves, B.B.. (Org.). **Geologia do continente Sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. 1 ed. São Paulo: Beca, v. 1, p. 461-469, 2004.

SUGUIO, K. Introdução. In: SOUZA *et al* (Orgs). **Quaternário do Brasil**. Ribeirão Preto/SP: Holos, p. 21-27, 2005.

TESTA, V.; BOSENSE, D. W. J. Carbonate-siliciclastic sedimentation on high-energy, ocean-facing, tropical ramp, NE Brazil. WRIGHT, V.P., BURCHETTE, T.P. (Eds) **Carbonate Ramps**, Geological Society, London, Special Publications, v. 149, p. 55-71, 1998.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Shuttle Radar Topography Mission. Disponível em: <http://srtm.usgs.gov/mission.php>. Acessado em outubro de 2017.

UDDEN J. A. Mechanical composition of clastic sediments. **Bulletin of the Geological Society of America** v. 25, p. 655–744, 1898

UDDEN, J. A. The mechanical composition of wind deposits. **Augustana Library Pub. 1**, Lutheran Augustana Library, Rock Island, Ill., USA. 1898.

ULUĞ, A.; DUMAN, M.; ERSOY, Ş.; ÖZEL, E.; AVCI, M. Late Quaternary sea-level change, sedimentation and neotectonics of the Gulf of Gökova: Southeastern Aegean Sea. **Marine Geology**, v. 221, n. 1, p. 381-395, 2005.

VASCONCELOS, D. L. **Indicadores do nível relativo do mar e evolução costeira durante o holoceno tardio no litoral oeste do Ceará, NE do Brasil**. 86 p. 2014. Dissertação de Mestrado (Universidade Federal do Rio Grande do Norte). 2014

- VELOSO, J. F. **Considerações sobre a análise granulométrica de sedimentos praias**. 2001, 107p. Tese (Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro), 107p., 2001.
- VILAÇA, J. C.; NOGUEIRA, A. M. B.; SILVEIRA, I. M.; CARVALHO M. S.; CUNHA E. M. S. Geologia Ambiental da Área Costeira da Ponta de Búzios à Barra de Maxaranguape, RN. In: SBG, XII Simpósio de Geologia do Nordeste, 12. p. 220- 227, 1985.
- VITAL, H.; STATTEGGER, K.; AMARO, V.; SCHWARZER, K.; FRAZÃO, E. P.; SILVEIRA, I. M.; CALDAS, L. H. O. Interactions of sea level and tectonics on large-scale bedforms preserved on a tropical shelf: The Rio Grande do Norte shelf, northeastern Brazil. In: **Second Conference IGCP464**, Cananéia, pp. 99-100. 2002.
- WALKER R. G. Facies modelling and sequence stratigraphy. **Journal of Sedimentary Petrology**, 60: 777-786. 1990.
- WALKER, R. G. Cardium Formation: Sedimentology and stratigraphy in the Garrington - Caroline area. **Bulletin of Canadian Petroleum Geology**, v. 31, p. 213–230, 1983
- WALKER, R.G. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. *In*: WALKER, R.G. & JAMES, N.P. (eds.) **Facies Models- response to sea level change**, Toronto, **Geological Association of Canada**. p. 1-14, 1992.
- WALKER, R.G. General Introduction: Facies, Facies Sequences and Facies Models. *In* Walker, R.G. (ed.) **Facies Models**. Geological Association of Canada, Geoscience Canada, Reprint Series 1, 1-10. 1984.
- WENTWORTH, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments, **J. Geology** v. 30, p. 377–392, 1922.
- XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, **International Journal of Remote Sensing**, 27:14, 3025-3033, 2006.
- ZACCHI, E. N. P.; SILVA, A. M.; ROLIM, V. K. Análise Integrada de Dados Multifonte e sua Aplicação no Mapeamento Geológico das Formações Ferríferas da

Serra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas, MG. **RBGf (Revista Brasileira de Geofísica)**. 643-656, 2010.