



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

TESE DE DOUTORADO

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA, GEOMORFOLÓGICA E
OCEANOGRÁFICA DO SISTEMA PISA SAL, GALINHOS/RN -
NORDESTE DO BRASIL, COM ÊNFASE À EROÇÃO, AO TRANSPORTE
E À SEDIMENTAÇÃO.**

Autor:

LEÃO XAVIER DA COSTA NETO

Orientadora:

Profa. Dra. Helenice Vital

DG-PPGG-UFRN

Co-orientador:

Prof. Dr. Mário Pereira da Silva

DGEF-UFRN

Tese nº 025 / PPGG

Natal-RN, fevereiro de 2009.



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

TESE DE DOUTORADO

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA, GEOMORFOLÓGICA E OCEANOGRÁFICA DO SISTEMA PISA SAL, GALINHOS/RN - NORDESTE DO BRASIL, COM ÊNFASE À EROÇÃO, AO TRANSPORTE E À SEDIMENTAÇÃO.

Autor:

LEÃO XAVIER DA COSTA NETO

Tese de doutorado apresentada em 27 de
fevereiro de 2009, para obtenção do título
de Doutor em Geodinâmica pelo Programa
de Pós-Graduação em Geodinâmica e
Geofísica da UFRN

Comissão Examinadora:

PROF^a. Dr^a. HELENICE VITAL (DG-PPGG-UFRN - Orientadora)

PROF. Dr. MÁRIO PEREIRA DA SILVA (DGEF-UFRN - Co-orientador)

PROF^a. Dr^a ZULEIDE MARIA CARVALHO LIMA (PGGO/UFRN)

PROF. Dr. PEDRO WALFIR MARTINS E SOUZA FILHO (DGL/UFPA)

PROF. Dr. MOACYR CUNHA DE ARAÚJO FILHO (DOCEAN/UFPE)

Natal-RN, fevereiro de 2009.

TESE DE DOUTORADO

Tese de doutorado desenvolvida no âmbito do Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGG/UFRN), tendo sido subsidiada pelos seguintes agentes financiadores:

- CNPq através do Grant Pesquisador processos N° 350.881/1999-5 e 312275/2006-4.

- Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.

Como também, teve o apoio logístico e na utilização de equipamentos das seguintes entidades:

- Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica-PPGG (UFRN).
- Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha-GGEMMA (PPGG/UFRN).
- Centro Federal de Educação Tecnológica do RN-CEFET/RN.



*Dedico esta obra aos elos que sustentam a corrente da minha vida:
minha avó Lourdes, a serenidade e a resistência;
meus pais Raimundo e Salete, a orientação e a humildade;
minha mulher Denise, a força interior e o amor;
minhas filhas Laís e Luana, o ar que respiro.*

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento das características físico-ambientais do sistema Pisa Sal, especificamente, a configuração batimétrica, a caracterização faciológica e a morfologia de fundo; o padrão de circulação das correntes de marés e das propriedades termohalinas; as zonas de erosão e sedimentação, o volume de material erodido e suas relações com a hidrodinâmica; o transporte de sedimentos, a idade dos sedimentos e a taxa de sedimentação. Para isso, foram realizados levantamentos, meteorológico, batimétrico, sonográfico, oceanográfico (correntes e propriedades termohalinas), topográfico, amostragem de sedimentos de fundo e suspensão e datação por ^{14}C e ^{210}Pb . O sistema Pisa Sal faz parte do complexo estuarino lagunar Galinhos-Guamaré, localizado no litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte, no município de Galinhos-RN, uma região sob influência da indústria salineira, carcinicultura e indústria petrolífera. As informações meteorológicas definem para região um clima seco com temperatura elevada, precipitação baixa e ventos fortes e constantes que influenciam sobremaneira nas alterações ambientais do sistema. O sistema Pisa Sal apresenta pequenas dimensões (extensão de 8,0 km, largura média de 150 m e profundidade máxima de -4,23 m), perfil longitudinal regular, perfil transversal em “V” (montante) e em “U” (jusante), gradiente horizontal e diferentes formas de leito (fundo plano, marcas de ondas, dunas subaquáticas 2D e 3D, superposição de formas e rochoso). As fácies sedimentares são representadas por sedimentos arenosos e lamosos de composição silicática, com variação na quantidade de grânulo e cascalho biotritados. Texturalmente, os sedimentos variam de areia muito grossa a silte. As correntes de marés variam de simétrica a fracamente assimétricas, com maiores velocidades durante as vazantes de sizígia no período de inverno, com direções que refletem a orientação dos canais. Os canais artificiais de despesca/drenagem (CDs) apresentam o mesmo comportamento do canal Pisa Sal, porém com menor intensidade. As propriedades termohalinas classificam o sistema Pisa Sal como um canal de maré com características hipersalinas, comportamento de um estuário inverso (negativo), verticalmente bem misturado, forçado, predominantemente, pela maré, no qual o processo de difusão turbulenta da maré é responsável pelo transporte de sal canal acima e que provoca a redução da salinidade ao longo do ano. A erosão no canal Pisa Sal e nos CDs estão associadas à margem côncava dos meandros causadas por fenômenos oceanográficos, climáticos e antrópicos, entre os quais destacam-se: as marés, as correntes de marés, a chuva, o escoamento superficial, o vento, as ondulações, a escavação de canais, a infiltração, a composição e a manutenção de taludes. O transporte de sedimentos de fundo e suspensão é controlado pela variação da velocidade das correntes de marés. O transporte é mais eficiente durante as marés de sizígia e nos ciclos de vazante, causando exportação de sedimentos. A idade dos sedimentos do canal Pisa Sal é de 1562 ± 22 cal AP e do canal Volta do Sertão é $332-432 \pm 25$ anos cal AP. A taxa de sedimentação nesses dois canais varia de 0,47 e 0,50 cm/ano, respectivamente. As atividades econômicas da indústria salineira, da carcinicultura e da indústria petrolífera associadas aos fenômenos naturais (temperatura do ar e nível de evaporação alto, índice de precipitação baixo, regime de mesomaré, velocidade alta das correntes de marés e ação dos ventos) são responsáveis pelas alterações ambientais que ocorrem no sistema Pisa Sal.

palavras-chave: monitoramento, erosão, transporte, sedimentação, impactos ambientais.

ABSTRACT

The present work has as objective to study the behavior of physical-environmental characteristics of the Pisa Sal system, particularly the bathymetry, the facies characterization and the bottom morphology; the pattern of tidal currents circulation and of the termohalinas properties; the erosion and sedimentation zones, the bulk erosion and your relationships with the hydrodynamic; the sediments transport, the sediments age and sedimentation rate. The integrated data set used includes meteorological, bathymetric, sonographic, oceanographic (currents and termohalinas properties), topographic and sedimentological data, as well ^{14}C and ^{210}Pb datation. The Pisa Sal system is part of the Galinhos-Guamaré lagoon-estuarine complex, located in Galinhos, northern coast of the Rio Grande do Norte state. It is an area under influence of salt industry, shrimp farming and oil industry. The meteorological data classifies the area climate as dry, with high temperature, low precipitation and strong and constant winds, responsible for important environmental alterations in the system. The Pisa Sal system presents small dimensions (extension of 8,0 km, medium width of 150 m and maximum depth of -4,23 m), longitudinal profile to regulate, traverse profile in " V " (head) and in " U " (mouth), horizontal gradient, and different bedforms (e.g. ripples marks, 2D and 3D sub-aquatic dunes, flat, rocky). The sedimentary facies are represented by siliciclastic sandy and muddy sediments, with amount variation of biotrititic granule and gravel. The sediments texture varies from very coarse sand to silt. The tidal currents changes from weakly asymmetric to symmetrical, with higher speeds during the ebb-spring tide in the winter period, and directions reflecting the channels orientation. The drainage artificial channels (CDs) present the same behavior of the Pisa Sal channel, however with smaller intensity. The thermohaline properties classify the system as a tidal channel with hyper-saline characteristics, behavior of an inverse estuary (negative estuary), vertically very mixed, tidal forced, where the turbulent diffusion process is responsible for the salt transport and by the salinity reduction over the year. The Pisa Sal channel and CDs erosion are associated to the concave margin of the meandering channel caused by oceanographical, climatic and anthropic phenomena, which stand out: tides, tidal currents, rain, superficial drainage, winds, small waves, channels excavation, infiltration, composition and slope maintenance. The transport of bottom sediments and suspension is controlled by the speed variation of tidal currents. It is more efficient during the spring tides and in the ebb cycles, causing sediments exports. The age of the sediments of the Pisa Sal channel is 1562 ± 22 cal years AP and of the Volta do Sertão channel is $332-432 \pm 25$ cal years AP. The calculated sedimentation rates in these two channels was 0,47 and 0,50 cm/year, respectively. The economical activities of the salt industry, shrimp farming and oil industry associated to the natural phenomena (temperature of the air and high evaporation level, low precipitation index, mesotidal conditions, high speed of the tidal currents and winds) are responsible for the environmental alterations in the Pisa Sal system.

key words: *monitoring, erosion, transport, sedimentation, environmental impacts.*

AGRADECIMENTOS

A finalização desta obra leva-me a refletir sobre todos os momentos que passei durante o processo de sua elaboração, desde a primeira visita ao campo para reconhecimento da área até a última palavra escrita nas páginas que se seguem. Este momento, então, só foi possível devido à benção e à proteção que acredito ter recebido de Deus, nosso pai e criador, a quem agradeço nesse momento.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN e ao seu Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha/GGEMMA, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico/CNPq através do Grant Pesquisador, e a Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda., nas pessoas do seu ex-Diretor Comercial, Luis Eduardo Anchieta da Silva e dos técnicos, Lázaro Lemos da Silva, Giovanni Silva Rêgo e Helton Pacheco, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa na sua fazenda de engorda e pelo aporte financeiro necessário à realização desta pesquisa.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte-CEFET/RN, pelo interesse de minha inclusão no programa de doutorado da UFRN, bem como no empréstimo de equipamentos e no apoio logístico.

Ao projeto UNIBAL 021-04 (CAPES-DAAD), pelo custeio das datações de ^{14}C e ^{210}Pb e ao Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente/IDEMA pela cessão de imagens de satélite Ikonos.

À minha orientadora e amiga, professora Dr^a. Helenice Vital, que acreditou desde o primeiro momento na proposta deste trabalho e não mediu esforços para sua realização, deste a disponibilização de recursos, às discussões e às sugestões.

Ao meu co-orientador e amigo, professor Dr. Mário Pereira da Silva, que, prontamente, aceitou contribuir com o desenvolvimento da vertente oceanográfica deste trabalho, sempre se colocando à disposição para os trabalhos de campo e as discussões.

Ao professor Dr. Carlos Augusto Ramos e Silva do Departamento de Oceanografia e Limnologia-DOL, pelo empréstimo do CTD/correntômetro da *Valeport*.

Ao professor Omar Romero de Medeiros Sobrinho do Departamento de Engenharia Civil/UFRN, pelo acompanhamento nos trabalhos de campo e pelo empréstimo de uma estação total eletrônica.

Aos amigos geólogos Dr. Luis Parente Maia, Ms. Alexandre Rocha da Rocha, Ms. Eugênio Frazão e Dr. Werner Farkatt Tabosa, pelas constantes orientações e discussões técnicas.

Aos meus alunos, orientandos e bolsistas de IC do CEFET-RN: Danilo Ferraz, Hugo Nobre, Rafael Takeshi, Andréa Nolasco, Araceli Ratis, Sinara Silva, Selma Thais, Lívia Carolina, Jaidnara de Carvalho, Josué, Jordão, Vitor Diógenes, Silvan Maia e Antônio Carlos, pelo apoio irrestrito e incansável durante todas as etapas de campo e de laboratório, sem o qual eu não poderia ter realizado este trabalho. Obrigado!

Ao meu amigo e ex-aluno do Curso de Geologia do CEFET-RN, Msc. José Saraiva Junior, pela presteza em auxiliar-me nos trabalhos de campo e na utilização do *software* ArcGis. Da mesma forma, agradeço aos ex-alunos e amigos, Carolina da Rocha, Camila Soares, Tadeu de Melo, Gerson Romano Júnior, André Giskard, Fátima Alves, Gustavo da Rocha, Francisco dos Santos Neto (Chico) e Alessandra Mantovanelli, pela grande ajuda nos exaustivos trabalhos de campo e laboratório, pelas discussões técnicas e pelo auxílio na aquisição de artigos.

Aos técnicos, bolsistas e amigos do Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha/GGEMMA, Canindé Soares, José Estanislau Júnior, Sônia Leite, Adriana Teixeira, Emerson, pelo carinho e competência no desempenho das suas respectivas funções.

Aos incansáveis e prestativos motoristas da UFRN: Sr. Antônio, Sr. Pedro, Sr. Fernando Feitosa e Sr. Marinho, que foram fundamentais nos trabalhos de campo.

Aos barqueiros: Aurelino, Avião, Totó e Perrezinho, bem como aos ajudantes Neném e Virgulino, que nos guiaram com destreza em suas embarcações, de modo a facilitar a realização de nossas tarefas. Em especial, agradeço à figura humana do Sr. Aurelino Rodrigues, que sempre mostrou vigor e responsabilidade no trabalho.

À secretária do PPGG, Nilda de Araújo Lima, pelo carinho e dedicação às minhas demandas, bem como pela competência com que as atendeu.

À professora e amiga Msc. Leonor de Araújo Bezerra Oliveira, pelo carinho e dedicação dispensada na revisão lingüística desta obra.

Por fim, à minha mulher Denise Martins e às minhas filhas Laís e Luana, fonte do ar que respiro, por compreenderem e aceitarem os caminhos dessa nova empreitada, nos momentos de minha ausência para os trabalhos de campo, das inquietações devido ao grande volume de trabalho e dos poucos finais de semana de lazer. Muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMENTOS	iii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE APÊNDICES	xvii
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	4
1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA	4
CAPÍTULO 2 ESTRUTURA FÍSICO-AMBIENTAL	6
2.1 ESTRUTURA GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICA REGIONAL	6
2.1.1 Pré-Quaternário	6
2.1.2 Quaternário	9
2.2 ESTRUTURA GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICA LOCAL	12
2.2.1 Pré-Quaternário	12
2.2.2 Quaternário	12
2.3 CLIMA E AGENTES METEOROLÓGICOS	20
2.3.1 Clima	20
2.3.2 Insolação e Nebulosidade	21
2.3.3 Temperatura	22
2.3.4 Vento	22
2.3.5 Pluviometria	25
2.3.6 Umidade Relativa	27
2.4 HIDROGRAFIA	27
2.5 OCEANOGRAFIA	30
2.5.1 Maré	30
2.5.2 Corrente de Maré	32
2.5.3 Onda	33
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E CARTOGRÁFICA	36
3.2 TRABALHOS DE CAMPO	36
3.3 PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS	38
3.4 TRABALHOS DE GABINETE	38
CAPÍTULO 4 METEOROLOGIA DA REGIÃO ADJACENTE AO SISTEMA PISA SAL	40
4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS METEOROLÓGICOS	40
4.2 PARÂMETROS METEOROLÓGICOS	42
4.2.1 Vento	42
4.2.2 Temperatura do Ar	46
4.2.3 Precipitação	47
4.2.4 Umidade Relativa	49
4.3 DISCUSSÕES	50

CAPÍTULO 5 BATIMETRIA, MORFOLOGIA E FORMAS DE LEITO DO SISTEMA PISA SAL.....	53
5.1 ECOBATIMETRIA.....	53
5.1.1 Redução da Maré.....	55
5.1.2 Tratamento Estatístico.....	56
5.1.3 Batimetria e Morfologia do Sistema Pisa Sal.....	58
5.1.3.1 Canal Principal.....	58
5.1.3.2 Canais Artificiais.....	61
5.1.3.3 Bancos Arenosos e Lamosos.....	63
5.2 SONOGRAFIA.....	65
5.2.1 Formas de Leito.....	67
5.2.2 Formas de Leito no Sistema Pisa Sal.....	70
5.2.2.1 Fundo Plano.....	70
5.2.2.2 Marcas de Ondas.....	71
5.2.2.3 Dunas Subaquosas Transversais 2-D.....	71
5.2.2.4 Dunas Subaquosas Transversais 3-D.....	79
5.2.2.5 Superposição de Formas de Leito.....	80
5.2.2.6 Rochoso.....	81
5.3 DISCUSSÕES.....	81
 CAPÍTULO 6 CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA E TEXTURAL DO SISTEMA PISA SAL.....	 85
6.1 AMOSTRAGEM DE SEDIMENTOS DE FUNDO.....	85
6.2 PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS.....	87
6.3 TRABALHOS DE GABINETE.....	88
6.4 CARACTERIZAÇÃO TEXTURAL E FACIOLÓGICA.....	89
6.4.1 Sistema Pisa Sal.....	89
6.4.1.1 Textura dos Sedimentos e Parâmetros Estatísticos.....	89
6.4.1.2 Fácies Sedimentares.....	94
6.4.1.3 Fonte e Sumidouro de Sedimentos.....	97
6.4.2 Canais de Despesca/Drenagem (CDs).....	100
6.4.2.1 Textura dos Sedimentos e Parâmetros Estatísticos.....	100
6.4.2.2 Fácies Sedimentares.....	104
6.4.2.3 Fonte e Sumidouro de Sedimentos.....	110
6.5 DISCUSSÕES.....	112
 CAPÍTULO 7 CORRENTES E PROPRIEDADES TERMOHALINAS DO SISTEMA PISA SAL.....	 117
7.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS DE CORRENTE E PROPRIEDADES TERMOHALINAS.....	118
7.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS DE CORRENTE E PROPRIEDADES TERMOHALINAS.....	120
7.3 ANÁLISE DOS DADOS DE CORRENTE.....	125
7.3.1 Sistema Pisa Sal.....	126
7.3.1.1 Inverno.....	126
7.3.1.2 Verão.....	131
7.3.1.3 Dados de Correntes - S4.....	137
7.3.2 Canais de Despesca/Drenagem (CDs).....	140
7.4 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TERMOHALINAS.....	143
7.4.1 Estuários.....	143
7.4.2 O Complexo Estuarino Lagunar Galinhos-Guamaré.....	150

7.4.3 Sistema Pisa Sal	152
7.4.3.1 Inverno.....	152
7.4.3.2 Verão.....	157
7.5 DISCUSSÕES	161
 CAPÍTULO 8 CARACTERIZAÇÃO DA EROÇÃO NO SISTEMA PISA SAL	172
8.1 MONITORAMENTO TOPOGRÁFICO.....	172
8.2 ANÁLISE DOS PERFIS TOPOGRÁFICOS.....	175
8.2.1 Sistema Pisa Sal	176
8.2.2 Canais de Despesca/Drenagem (CDs)	180
8.3 ANÁLISE QUANTITATIVA DA EROÇÃO.....	185
8.3.1 Sistema Pisa Sal	185
8.3.2 Canais de Despesca/Drenagem (CDs)	187
8.4 AGENTES E FEIÇÕES EROSIVAS.....	190
8.5 DISCUSSÕES.....	192
 CAPÍTULO 9 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO SISTEMA PISA SAL	196
9.1 MÉTODOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	196
9.1.1 Método de van Rijn	198
9.1.1.1 Início do Movimento das Partículas.....	199
9.1.1.2 Transporte de Sedimentos e Balanço Sedimentar.....	201
9.2 CANAL PISA SAL.....	202
9.2.1 Carga de Fundo (Q_f)	206
9.2.2 Carga em Suspensão (Q_s)	210
9.2.3 Carga Total (Q_t)	210
9.3 CANAIS DE DESPESCA/DRENAGEM (CDs).....	211
9.3.1 Carga de Fundo (Q_f)	213
9.3.2 Carga em Suspensão (Q_s)	214
9.3.3 Carga Total (Q_t)	215
9.3 DISCUSSÕES.....	216
 CAPÍTULO 10 DATAÇÃO E TAXA DE SEDIMENTAÇÃO DO SISTEMA PISA SAL	220
10.1 AMOSTRAGEM E PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS.....	220
10.2 MÉTODO AMS ^{14}C	223
10.3 MÉTODO GAMA-ESPECTOMÉTRICO ^{210}Pb	225
10.4 IDADE DOS SEDIMENTOS E TAXA DE SEDIMENTAÇÃO.....	228
10.4.1 Idade dos Sedimentos	228
10.4.2 Taxa de Sedimentação (TS)	230
10.5 DISCUSSÕES.....	233
 CONCLUSÕES	239
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	248
 APÊNDICES	262

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Mapa de localização da área de estudo.....	5
Figura 2.1	Arcabouço estrutural da Bacia Potiguar.....	7
Figura 2.2	Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar.....	8
Figura 2.3	Morfologia da zona costeira durante o máximo da transgressão holocênica, paleogeografia da costa durante a regressão do nível do mar e geologia e morfologia da costa atual entre a Ponta dos Três Irmãos e Galinhos.....	10
Figura 2.4	Mapa geológico da região do complexo estuarino lagunar Galinhos- Guamaré, modificado de Camarus (2003).....	13
Figura 2.5	Planície de supramaré ocupada por viveiros, canais de drenagem, planície de intermaré, bancos areno lamosos e salinas.....	15
Figura 2.6	Fotografia aérea mostrando a localização dos <i>vibro-core</i> no sistema estuarino-lagunar de Galinhos-Guamaré.....	16
Figura 2.7	Fácies sedimentares, variação do tamanho do grão, estruturas sedimentares e idades radiocarbono AMS das amostras das sondagens de <i>vibro-cores</i> no município de Galinhos/RN.....	17
Figura 2.8	Médias mensais e anual da nebulosidade e da insolação total para a região de Galinhos-RN.....	21
Figura 2.9	Médias mensais e anual da temperatura para a região de Galinhos-RN.....	22
Figura 2.10	Diferentes posições ocupadas pela ZCIT durante o ano e padrão dos ventos sobre a costa do Nordeste brasileiro.....	23
Figura 2.11	Velocidade média mensal e anual do vento na região de Galinhos-RN.....	24
Figura 2.12	Roseta com direção e frequência do vento em Guamaré-RN.....	25
Figura 2.13	Médias mensais e anual das precipitações nos postos pluviométricos de Guamaré e Córregos (Pedro Avelino).....	26
Figura 2.14	Mapa de isoetas anuais para o município de Galinhos-RN e comportamento das precipitações para os postos pluviométricos de Guamaré, Córregos, Jandaíra e São Bento do Norte.....	26
Figura 2.15	Médias mensais da umidade relativa na região de Galinhos-RN.....	27
Figura 2.16	Mapa de localização da Bacia Hidrográfica da Faixa Litorânea Norte de Escoamento Difuso 15-4.....	28
Figura 2.17	Vista aérea dos canais de marés cartografados como “rios” e os canais de drenagem da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.....	29
Figura 2.18	Medidas das amplitudes das marés no porto de Guamaré-RN.....	31
Figura 2.19	Direção e intensidade das correntes de marés e deriva litorânea na região de Galinhos/RN.....	32
Figura 2.20	Altura média das ondas medidas na região de Guamaré.....	34
Figura 3.1	Fluxograma das atividades desenvolvidas neste trabalho.....	35
Figura 4.1	Mapa de localização da estação meteorológica instalada na sede administrativa da empresa Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.....	41
Figura 4.2	Estação meteorológica instalada no topo da caixa d’água da sede administrativa da empresa Camarus.....	42

Figura 4.3	Velocidades mínimas médias, médias, máximas médias, média das mínimas e máximas absolutas do vento no município de Galinhos/RN no período de junho de 2004 a julho de 2006.....	43
Figura 4.4	Velocidades máximas absolutas do vento no município de Galinhos/RN no período de junho de 2004 a julho de 2006.....	43
Figura 4.5	Estacionamento da sede administrativa da Camarus Aquacultura do Nordeste destelhada por ventos fortes.....	44
Figura 4.6	Direções e velocidades médias mensais dos ventos no município de Galinhos/RN no período de junho de 2004 a julho de 2006.....	45
Figura 4.7	Temperaturas mínima, média e máxima no município de Galinhos/RN no período de junho de 2004 a julho de 2006.....	46
Figura 4.8	Precipitação anual, total e média do município de Galinhos/RN no período de junho de 2004 a julho de 2006.....	47
Figura 4.9	Precipitação mensal acumulada no município de Galinhos/RN no período de junho de 2004 a julho de 2006.....	48
Figura 4.10	Precipitação mensal no município de Galinhos/RN no período de junho de 2004 a julho de 2006.....	48
Figura 4.11	Relação entre a precipitação acumulada mensal e a temperatura média mensal no município de Galinhos/RN no período de junho de 2004 a julho de 2006.....	49
Figura 4.12	Umidade relativa mensal média e média geral no município de Galinhos/RN no período de junho de 2004 a julho de 2006.....	50
Figura 4.13	Relação mensal média entre a umidade relativa e a precipitação no município de Galinhos/RN no período de junho de 2004 a julho de 2006.....	50
Figura 5.1	Mapa de localização das sondagens batimétricas no sistema Pisa Sal.....	54
Figura 5.2	Diagrama de nivelamento da estação maregráfica do porto de Guamaré/RN.....	55
Figura 5.3	Variação da amplitude das marés durante as sondagens batimétricas.....	56
Figura 5.4	Semivariograma e mapa de variabilidade amostral da krigagem 1.....	57
Figura 5.5	Semivariograma e mapa de variabilidade amostral da krigagem 2.....	58
Figura 5.6	Mapa batimétrico e localização dos perfis batimétricos do sistema Pisa Sal, Galinhos/RN.....	59
Figura 5.7	Perfis batimétricos transversais às estações oceanográficas E1, E2 e E3.....	60
Figura 5.8	Perfil batimétrico do canal esculpido no leito do Pisa Sal.....	61
Figura 5.9	Configuração e dimensões dos canais de drenagem (CDs) e taludes da fazenda de criação de camarões da Camarus.....	62
Figura 5.10	Morfologia dos canais de drenagem/despesca (CDs) nos pontos de monitoramento topográfico.....	62
Figura 5.11	Perfil batimétrico da barra de pontal no canal Volta do Sertão.....	63
Figura 5.12	Perfil batimétrico longitudinal no sentido canal de Galinhos-Canal Pisa Sal mostrando a soleira sedimentar.....	64
Figura 5.13	Perfis batimétricos transversal ao canal Pisa Sal mostrando os bancos na desembocadura do CD1 e CD2.....	64
Figura 5.14	Mapa de localização dos perfis sonográficos no rio Pisa Sal.....	65

Figura 5.15	Sistema de sonar de varredura lateral.....	66
Figura 5.16	Diagrama da velocidade média do fluxo versus mediana (Adaptado de Ashley, 1990).....	68
Figura 5.17	Sonogramas da margem direita do canal Pisa Sal mostrando a classificação das formas de leito.....	72
Figura 5.18	Sonogramas da margem direita do canal Pisa Sal mostrando a classificação das formas de leito.	73
Figura 5.19	Sonogramas da margem direita do canal Pisa Sal mostrando a classificação das formas de leito.	74
Figura 5.20	Sonogramas da margem esquerda do canal Pisa Sal mostrando a classificação das formas de leito.	75
Figura 5.21	Sonogramas da margem esquerda do canal Pisa Sal e do canal Volta do Sertão mostrando a classificação das formas de leito.....	76
Figura 5.22	Sonogramas da margem esquerda do canal Pisa Sal mostrando a classificação das formas de leito.....	77
Figura 5.23	Diagrama de Flemming (1988), log-log da altura (H) em relação ao comprimento (L) de formas de leito subaquáticas transversais ao fluxo dos canais do sistema Pisa Sal.....	78
Figura 5.24	Marcas de ondas assimétricas, cristas retilíneas e curvas ocorrem isoladas ou sobrepostas a dunas pequenas 3-D com sentido do fluxo.....	78
Figura 5.25	Diagrama de Flemming (1988), log-log da altura (H) em relação ao comprimento (L) (sonogramas) de formas de leito subaquáticas transversais ao fluxo dos canais do sistema Pisa Sal.....	79
Figura 5.26	Dunas subaquáticas pequenas 3-D localizadas na foz e interior do canal Pisa Salzinho e no canal Volta do Sertão.....	80
Figura 5.27	Extrato do mapa batimétrico mostrando os canais recentes esculpidos pelos CDs e os bancos definidos pela batimetria e foto mostrando a desembocadura do CD1 com o canal recente esculpido no leito do Pisa Sal; banco areno lamoso formado pelo mecanismo de molhe hidráulico de maré.....	83
Figura 6.1	Localização das amostras de sedimentos de fundo e dos perfis topográficos no sistema Pisa Sal, Galinhos/RN.....	86
Figura 6.2	Classes texturais dos sedimentos de fundo do sistema Pisa Sal, Galinhos/RN com base no diâmetro médio.....	90
Figura 6.3	Conteúdo de cascalho, areia e lama nos sedimentos de fundo do sistema Pisa Sal, Galinhos/RN.....	91
Figura 6.4	Diagrama de dispersão bivariada (média x selecionamento) das amostras do sistema Pisa Sal, Galinhos/RN no centro dos canais e nas margens e bancos.....	92
Figura 6.5	Diagrama de dispersão bivariada (média x assimetria) das amostras do sistema Pisa Sal, Galinhos/RN no centro dos canais e nas margens e bancos.....	93
Figura 6.6	Distribuição de fácies sedimentares ao longo do sistema Pisa Sal, Galinhos/RN.....	95
Figura 6.7	Extrato do mapa geológico mostrando a área de influência do sistema Pisa Sal e localização dos perfis topográficos.....	98
Figura 6.8	Sedimentos areno lamosos de supramaré com escarpa de erosão e sedimentos arenosos eólicos fixos com escarpa de erosão.....	99

Figura 6.9	Fácies sedimentares ao longo dos perfis topográficos perpendiculares as margens dos canais do Pisa Sal, Volta do Sertão e Pisa Salzinho, Galinhos/RN.....	99
Figura 6.10	Classificação textural (diâmetro médio) dos sedimentos de fundo no centro do CD1 e CD2.....	101
Figura 6.11	Conteúdos de cascalho, areia e lama nos sedimentos de fundo no centro do CD1 e CD2.....	103
Figura 6.12	Diagrama de dispersão bivariada (média x selecionamento) das amostras no centro e margens dos CDs nos períodos de verão e inverno.....	104
Figura 6.13	Diagrama de dispersão bivariada (média x assimetria) das amostras no centro e margens dos CDs nos períodos de verão e inverno.....	104
Figura 6.14	Fácies sedimentares do centro do CD1 e CD2.....	106
Figura 6.15	Talude do viveiro em frente ao P3 com grande quantidade de conchas de bivalves e ravinamentos.....	109
Figura 6.16	Erosão da planície de supramaré pela ação das marés de sizígia e das correntes de marés.....	110
Figura 6.17	Material do talude dos viveiros erodido e transportado para o interior dos CDs em frente ao perfil P3 e entre o P3 e P4.....	111
Figura 6.18	Areia muito fina e silte transportados dos viveiros pela ação dos ventos recobrimdo as conchas nos taludes.....	111
Figura 6.19	Transporte da cal virgem pelo vento durante o processo de distribuição pelo viveiro.....	111
Figura 6.20	Localização das amostras de fundo, diagrama de dispersão bivariada (média x selecionamento) e diagrama de dispersão bivariada (média x assimetria) que constam em Röber <i>et al.</i> 2005.....	114
Figura 7.1	Referencial do modelo unidimensional de águas rasas de um canal.....	117
Figura 7.2	Mapa de localização das estações hidrográficas no sistema Pisa Sal, Galinhos/RN.....	118
Figura 7.3	Sonda da marca Valeport, modelo 108 Mk III-308 <i>Current Meters</i> com correntômetro e CTD conjugados.....	119
Figura 7.4	Bóia S4 mostrando os sensores para determinação dos parâmetros da corrente, bóias para estabilização e verticalização da S4 e peso para fixação da bóia no fundo do canal.....	120
Figura 7.5	Fluxograma com as principais rotinas MatLab utilizadas no programa Estuário para obtenção de parâmetros hidrográficos e correntográficos de estuários (da Silva, 2005).....	122
Figura 7.6	Co-oscilação da maré para dois ciclos consecutivos nos períodos de inverno-quadratura, inverno-sizígia, verão-quadratura e verão-sizígia extraídas da tábua de maré da DHN/Marinha do Brasil do porto de Guamaré/RN.....	125
Figura 7.7	Variação temporal dos perfis da componente longitudinal da velocidade (u) no canal do Pisa Sal medidas nas estações E1, E2 e E3 durante a maré de quadratura e sizígia no período do inverno.....	127
Figura 7.8	Direções da componente longitudinal da corrente (u) no canal do Pisa Sal medidas nas estações E1, E2 e E3 durante a maré de quadratura e sizígia no período do inverno.....	129

Figura 7.9	Isopletras da componente longitudinal u e componente transversal v da velocidade da corrente de maré no canal do Pisa Sal nas estações E1, E2 e E3 durante a maré de quadratura no período de inverno.....	130
Figura 7.10	Perfil médio temporal da componente longitudinal da velocidade $\langle u(Z) \rangle$ e velocidade residual (u_a) no canal do Pisa Sal medidas nas estações E1, E2 e E3 na maré de quadratura e sizígia no período de inverno.....	132
Figura 7.11	Variação temporal dos perfis da componente longitudinal da velocidade (u) no canal do Pisa Sal medidas nas estações E1, E2 e E3 durante a maré de quadratura no período do verão.....	133
Figura 7.12	Direções da componente longitudinal da corrente (u) no canal do Pisa Sal medidas nas estações E1, E2 e E3 durante a maré quadratura no período do verão.....	135
Figura 7.13	Isopletras da componente longitudinal u e componente transversal v da velocidade da corrente de maré no canal do Pisa Sal nas estações E1, E2 e E3 durante a maré de quadratura no período de verão.....	136
Figura 7.14	Perfil médio temporal da componente longitudinal da velocidade $\langle u(Z) \rangle$ no canal do Pisa Sal medidas nas estações E1, E2 e E3 durante a maré de quadratura no período de verão.....	138
Figura 7.15	Curva de variação da lâmina d'água ao longo do período amostrado na estação E4 e rebaixamento da superfície livre durante as estofas de enchente.....	139
Figura 7.16	Variação da lâmina d'água e componentes u , direções das marés de vazante e enchente na estação E4.....	140
Figura 7.17	Altura da coluna d'água neste levantamento (julho/07) e amplitude da maré (porto de Guamaré, DHN).....	141
Figura 7.18	Variação da lâmina d'água, componente u e direções das marés de vazante e enchente na estação E5.....	142
Figura 7.19	Variação da lâmina d'água, componente u e direções das marés de vazante e enchente na estação E6.....	143
Figura 7.20	Representação esquemática das definições de estuário segundo Pritchard (1967) e Dalrymple <i>et al.</i> (1992).....	144
Figura 7.21	Tipos fisiográficos de estuários segundo Fairbridge (1980 <i>apud</i> Miranda 2002).....	148
Figura 7.22	Paleogeografia da costa na região de Galinhos-São Bento do Norte-RN em ~5.900 anos BP e morfologia em ~ 3.600 anos BP (B) (modificado de Caldas, 2002).....	151
Figura 7.23	Variação temporal da temperatura na coluna d'água do canal Pisa Sal nas estações E1, E2 e E3 no período de inverno durante as marés de quadratura e sizígia.....	154
Figura 7.24	Variação temporal da salinidade na coluna d'água do canal Pisa Sal nas estações E1, E2 e E3 no período de inverno durante as marés de quadratura e sizígia.....	155
Figura 7.25	Variação temporal de Sigma-t na coluna d'água do canal Pisa Sal nas estações E1, E2 e E3 no período de inverno durante as marés de quadratura e sizígia.....	156
Figura 7.26	Variação temporal da temperatura na coluna d'água do canal Pisa Sal nas estações E1, E2 e E3 no período de verão durante as marés de quadratura e sizígia.....	158

Figura 7.27	Variação temporal da salinidade na coluna d'água do canal Pisa Sal nas estações E1, E2 e E3 no período de verão durante as marés de quadratura e sizígia.....	159
Figura 7.28	Variação temporal da temperatura na coluna d'água do canal Pisa Sal nas estações E1, E2 e E3 no período de verão durante as marés de quadratura e sizígia.....	160
Figura 7.29	Variação geral da simetria da maré e durante as fases de levantamento ao longo do canal.....	161
Figura 7.30	Velocidades residuais (u_a) nas estações E1 a E3 nas condições ambientais de inverno e verão nas marés de quadratura e sizígia.....	165
Figura 7.31	Mapa das velocidades médias de vazante e enchente da componente longitudinal (u) nas estações no canal do Pisa Sal (E1 a E4) e canais de drenagens (E5 e E6), Galinhos/RN.....	166
Figura 7.32	Variação longitudinal da diferença das propriedades termohalinas (temperatura, salinidade e densidade) entre o inverno e verão (iv-vr) durante as marés de quadratura e sizígia..	167
Figura 7.33	Perfil longitudinal da salinidade no canal Pisa Sal no inverno e verão e nas marés de quadratura e sizígia.....	168
Figura 7.34	Variação da salinidade em relação à co-oscilação da maré nas estações E1, E2 e E3 nos períodos de inverno e verão, durante as marés de quadratura e sizígia.....	170
Figura 8.1	Mapa de localização dos perfis topográficos no sistema Pisa Sal, Galinhos-RN.....	173
Figura 8.2	Aspecto ambiental dos locais dos perfis topográficos no sistema Pisa Sal e canais de drenagem (CDs).....	174
Figura 8.3	Configuração e dimensões dos canais de drenagem (CDs) e taludes da fazenda de criação de camarões da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.....	175
Figura 8.4	Perfil topográfico P7 monitorado no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).....	176
Figura 8.5	Perfil topográfico P8 monitorado no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).....	177
Figura 8.6	Perfil topográfico P9 monitorado no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).....	177
Figura 8.7	Perfil topográfico P10 monitorado no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).....	178
Figura 8.8	Perfil topográfico P11 monitorado no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).....	179
Figura 8.9	Perfil topográfico P12 monitorado no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).....	180
Figura 8.10	Perfil topográfico P1 monitorado no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).....	180
Figura 8.11	Perfil topográfico P2 monitorado no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).....	181
Figura 8.12	Perfil topográfico P3 monitorado no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).....	182
Figura 8.13	Perfil topográfico P4 monitorado no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).....	183
Figura 8.14	Perfil topográfico P5 monitorado no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).....	183

Figura 8.15	Perfil topográfico P6 monitorado no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).....	184
Figura 8.16	Perfil topográfico P13 monitorado no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).....	185
Figura 8.17	Volume total de material erodido e depositado (m^3/m) nos 6 perfis monitorados no sistema Pisa Sal no período de junho de 2004 a agosto de 2006.....	186
Figura 8.18	Volume total de material erodido e depositado (m^3/m) nos 7 perfis monitorados nos canais de despeça (CDs) no período de junho de 2004 a agosto de 2006.....	188
Figura 8.19	Imagem Ikonos (2003) mostrando a localização do P4, do canal de drenagem (CD1), a distância do CD para a franja de mangue e para o canal Pisa Sal.....	190
Figura 8.20	Deslizamentos, queda de blocos e feições erosivas na margem esquerda do CD1 em frente aos perfis P3 e P4.....	191
Figura 8.21	Feições erosivas no talude dos viveiros em frente ao P3.....	192
Figura 8.22	Mapa de localização das zonas de erosão com volume de material erodido (m^3/ano) e zonas de sedimentação de bancos arenosos e lamosos.....	193
Figura 9.1	Diagrama de Shields (1936) para cálculo do parâmetro de mobilidade crítica (Φ_{cr}).....	200
Figura 9.2	Mapa de localização das seções transversais ao canal do Pisa Sal nas estações E1, E3, E5 (CD1) e E6 (CD2) e seções transversais nas estações E1 e E3.....	203
Figura 9.3	Diagrama de classificação de formas de fundo em regime de fluxo inferior e transicional nas estações E1 e E3 segundo os parâmetros da partícula (D^*) e de transporte (T) (modificado de van Rijn, 1984c).....	209
Figura 9.4	Seção transversal dos canais de drenagem/despesca nas estações E5 e E6 com suas respectivas larguras e profundidades médias.....	211
Figura 9.5	Diagrama de classificação de formas de fundo em regime de fluxo inferior e transicional nas estações E5 e E6 segundo os parâmetros da partícula (D^*) e de transporte (T) (modificado de van Rijn, 1984c).....	215
Figura 9.6	Pluma de sedimentos em suspensão na margem esquerda do canal Pisa Sal em frente a estação E1.....	217
Figura 10.1	Mapa de localização das sondagens <i>vibro core</i> (VCGA) e <i>push core</i> (TUGA) no sistema Pisa Sal, Galinhos-RN.	221
Figura 10.2	Série radioativa do ^{238}U , setor do ^{226}Ra ao ^{210}Pb e suas respectivas meias-vidas.....	226
Figura 10.3	Curvas de calibração dos testemunhos <i>vibro core</i> VCGA-02 e VCGA-03B no sistema Pisa Sal segundo Stuvier <i>et al</i> (1998) indicando as idades calibradas (adaptado de Dibbern, 2007).....	229
Figura 10.4	Perfil da distribuição textural dos testemunhos VCGA-02 e VCGA-03B e atividade ^{210}Pb não suportado em relação à profundidade no testemunho TUGA-02 e TUGA-03B.....	231
Figura 10.5	Idade das amostras dos testemunhos TUGA-02 e TUGA-03B em relação a profundidade.....	232
Figura 10.6	Taxa de sedimentação (TS) dos testemunhos TUGA-02 e TUGA-03B em relação a profundidade.....	233

Figura 10.7	Fácies sedimentares, granulometria, estrutura sedimentares e idades AMS ^{14}C segundo este trabalho (VCGA-02 e VCGA-03B) e segundo Caldas (2002) (VCGAL-7 e VCGAL-8).....	234
Figura 10.8	Bancos lamosos em ambiente de intermaré na margem esquerda do canal do Pisa Sal onde foi coletado o testemunho VCGA-02 e VCGA-03B.....	235
Figura 10.9	Taxa de sedimentação (TS) no período de 1868 a 2006 nos canais do Pisa Sal (TUGA-02) e Volta do Sertão (TUGA-03B).....	237
Figura 10.10.	Precipitação anual (mm) no período de 1962 a 2005 na Estação Meteorológica de Guamaré/EMPARN.....	238

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Fácies texturais e respectivas permeabilidades dos sedimentos da área da fazenda de criação de camarão da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.....	18
Tabela 4.1	Temperaturas mínimas e máximas médias, médias e a amplitude entre as máximas e mínimas médias anuais no município de Galinhos na estação meteorológica instalada na sede administrativa da empresa Camarus no período de maio de 2004 a agosto de 2006.....	46
Tabela 5.1	Variáveis geo-estatísticas das krigagens 1 e 2 realizadas no banco de dados batimétricos.....	57
Tabela 5.2	Classificação das grandes formas de leito subaquosas transversais recomendada pelo Simpósio SEPM Bedforms and Bedding Structures Research Symposium (Ashley, 1990).....	69
Tabela 5.3	Comprimentos (L) e alturas (H) das dunas subaquáticas transversais 2-D no sistema Pisa Sal.....	71
Tabela 5.4	Comprimentos de ondas (L) e alturas (H) das dunas subaquáticas transversais 3-D no sistema Pisa Sal.....	79
Tabela 6.1	Classificação de sedimentos do fundo marinho de acordo com Vital <i>et al.</i> (2005, modificado de Freire <i>et al.</i> , 1997).....	88
Tabela 6.2	Conteúdo de cascalho, areia, lama, carbonato e matéria orgânica nos sedimentos de fundo do sistema Pisa Sal.....	96
Tabela 6.3	Concentrações máximas, médias e mínimas de cascalho, areia, lama, carbonato e matéria orgânica nos sedimentos dos canais de drenagens (CDs) da empresa Camarus nas campanhas de verão e inverno.....	107
Tabela 6.4	Classes de arredondamento dos grãos de quartzo nos sedimentos de fundo dos CDs.....	108
Tabela 7.1	Coordenadas UTM, declinação magnética (D), ângulo de rotação das estações oceanográficas (γ) e a profundidade média (P_{med}).....	121
Tabela 7.2	Velocidades máxima (u_{max}), média ($\bar{u}$), mínima (u_{min}) da componente u das correntes de marés durante o inverno e verão nas marés de quadratura e sizígia e nas fases de vazante e enchente nas estações fixas ao longo do canal do Pisa Sal, Galinhos/RN.....	126

Tabela 7.3	Velocidades máximas ($\bar{u}_{\max}$), médias ($\bar{u}$), mínimas ($\bar{u}_{\min}$) da componente u nas marés de vazante e enchente, alturas máximas ($h_{\max}$) e mínimas ($h_{\min}$) da lâmina d'água e amplitude da maré nas estações E5 a E6 durante a maré de sizígia no período de inverno (14 a 17.07.2007).....	142
Tabela 7.4	Variação da temperatura, salinidade e densidade nas estações E1, E2 e E3 no canal Pisa Sal durante o inverno e verão nas marés de quadratura e sizígia	153
Tabela 7.5	Velocidades médias da componente longitudinal (u) nas estações para as condições ambientais de inverno e verão no sistema Pisa Sal.....	163
Tabela 7.6	Velocidades médias de vazante e enchente nas marés de quadratura e sizígia durante o inverno e verão no canal do Pisa Sal.....	163
Tabela 7.7	Velocidades máximas médias de vazante e enchente nas marés de quadratura e sizígia durante o inverno e verão no canal do Pisa Sal.....	164
Tabela 7.8	Diferença entre a temperatura, a salinidade e a densidade médias da superfície da água e no fundo (Ss-Sf) durante o inverno e verão nas marés de quadratura e sizígia.....	167
Tabela 7.9	Fração do transporte horizontal de sal causado pela maré (ν) nas estações E1, E2 e E3 nos períodos de inverno e verão durante as marés de quadratura e sizígia.....	171
Tabela 8.1	Volume médio e volume total médio de material erodido nos trechos onde estão localizados os perfis topográficos.....	186
Tabela 8.2	Distâncias das escarpas das margens dos rios ao marco zero de cada perfil e taxa de erosão média anual das escarpas.....	187
Tabela 8.3	Volume médio anual de erosão nos perfis e CDs e volume médio total considerando todo comprimento dos trechos erodidos nos perfis topográficos.....	188
Tabela 8.4	Distâncias das escarpas das margens dos CDs ao marco zero de cada perfil e taxa de erosão média anual das escarpas.....	189
Tabela 9.1	Variáveis utilizadas no cálculo dos transportes de fundo (Q_f) e suspensão (Q_s) nas estações E1 e E3.....	204
Tabela 9.2	Velocidade média da componente longitudinal (u) e parâmetros para cálculo da carga de fundo (Q_t) segundo van Rijn (1984a).....	205
Tabela 9.3	Volume de sedimentos ($m^3/mês$) transportado como carga de fundo (Q_f), carga em suspensão (Q_s) e carga total (Q_t) de sedimentos de fundo durante o inverno e verão nos ciclos de quadratura e sizígia e nas fases de vazante e enchente considerando a velocidade média da componente longitudinal da corrente ($\bar{u}$) nas estações E1 e E3 no canal do Pisa Sal.....	207
Tabela 9.4	Volume de sedimentos ($m^3/mês$) transportado como carga de fundo (Q_f), carga em suspensão (Q_s) e carga total (Q_t) de sedimentos de fundo durante o inverno e verão nos ciclos de quadratura e sizígia e nas fases de vazante e enchente considerando a velocidade máxima média da componente longitudinal da corrente ($\bar{u}$) nas estações E1 e E3 no canal do Pisa Sal.....	208
Tabela 9.5	Variáveis utilizadas no cálculo dos transportes de fundo (Q_f) e suspensão (Q_s) nas estações E5 e E6 no período de inverno na	212

	maré sizígia e ciclo de vazante e enchente.....	
Tabela 9.6	Velocidade média da componente longitudinal (u) e parâmetros para cálculo da carga de fundo (Qt) segundo van Rijn (1984a).....	213
Tabela 9.7	Volume de sedimentos (m ³ /mês) transportado como carga de fundo (Qf), carga em suspensão (Qs) e carga total (Qt) de sedimentos de fundo durante o inverno na maré sizígia e ciclo de vazante e enchente considerando a velocidade média da componente longitudinal da corrente ($\bar{u}$) nas estações E5 e E6....	213
Tabela 9.8	Volume de sedimentos (m ³ /mês) transportado como carga de fundo (Qf), carga em suspensão (Qs) e carga total (Qt) de sedimentos de fundo durante o inverno na maré sizígia e ciclo de vazante e enchente considerando a velocidade máxima média da componente longitudinal da corrente ($\bar{u}$) nas estações E5 e E6.....	214
Tabela 9.9	Concentração de sólidos suspensos no interior e fora das plumas de sedimentos em suspensão na margem esquerda e direita da seção transversal na estação E1.....	218
Tabela 10.1	Características das sondagens <i>vibro core</i> (VCGA) e <i>push core</i> (TUGA) no sistema Pisa Sal.....	222
Tabela 10.2	Idades AMS ¹⁴ C das amostras <i>vibro core</i> VCGA-02 e VCGA-03B no sistema Pisa Sal segundo Stuvier <i>et al</i> (1998) (adaptado de Dibbern, 2007).....	230

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice 6.1	Frequência simples (%) da fração retida das amostras de fundo do sistema Pisa Sal.....	263
Apêndice 6.2	Percentuais de cascalho, areia, lama, areia+lama, carbonato e matéria orgânica nas amostras de fundo no sistema Pisa Sal....	265
Apêndice 6.3	Parâmetros estatísticos (mediana, média, selecionamento, assimetria e curtose) e classificação das amostras de fundo segundo Vital <i>et al.</i> (2005) do sistema Pisa Sal.....	266
Apêndice 9.1	Concentração mensal e concentração média no inverno e verão de sólidos em suspensão (SS) em amostras de água superficial nas estações E1 e E3.....	268
Apêndice 10.1	Dados da atividade do ²¹⁰ Pb e os cálculos da idade em função da profundidade no testemunho TUGA-02 (Dibbern, 2007).....	269
Apêndice 10.2	Dados da atividade do ²¹⁰ Pb e os cálculos da idade em função da profundidade no testemunho TUGA-03B (Dibbern, 2007).....	270

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, mais especificamente nos municípios de Galinhos e Guamaré, vem sendo, historicamente, e de forma mais intensa nas últimas décadas, alvo de importantes investimentos para implantação de grandes projetos econômicos que utilizam, como matéria prima, os recursos naturais. Entre estes projetos, destacam-se: a indústria salineira, implantada na região desde 1600; a exploração e o processamento de petróleo e gás natural, iniciada no final dos anos 70; a criação de camarões em cativeiro (carcinicultura), com seu primeiro momento na década de 80 e retornando no final da década de 90 com grandes investimentos. Além destas atividades, acrescentam-se: a ocupação humana em áreas com fragilidade ambiental (dunas e manguezais); o transporte fluvial e oceânico, que utiliza grandes embarcações para escoar seus produtos e materiais (salinas e indústria petrolífera); a pesca artesanal de peixes e extração de ostras nos canais de marés; e o ecoturismo, ainda incipiente, utilizando pequenas embarcações em passeios nos rios e canais de marés.

Neste cenário, é importante o estudo permanente das alterações ambientais que o complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré vem sofrendo, cumulativamente, ao longo do tempo, em resposta às ações inerentes às atividades acima citadas.

Associado às alterações ambientais provocadas pelos empreendimentos anteriormente citados, soma-se o efeito natural da dinâmica costeira, responsável por constantes alterações em ambientes sedimentares como lagunas, estuários, deltas, praias e canais de maré. Assim, é importante o estudo permanente das alterações ambientais que o complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré vem sofrendo cumulativamente ao longo do tempo em resposta às ações inerentes às atividades acima citadas.

Segundo Lima (2004) e Lima *et al.* (2006a, 2006b, 2002 e 2001), o complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré desenvolveu-se atrás de um sistema de antigas ilhas barreiras, com orientação aproximadamente E-W, em um litoral aberto, com regime de mesomaré e dominado por ondas.

Estudos desenvolvidos por Santos *et al.* (2003), Chaves (2006), Chaves *et al.* (2006) e Chaves e Vital (2001) mostram que os principais mecanismos de modelamento da referida laguna e da costa adjacente, tais como: as correntes de deriva litorânea, as correntes de marés e as ondas, continuam atuando fortemente.

Outros estudos (Caldas *et al.*, 2003 e 2006b; Stattegger *et al.*, 2006 e Caldas, 2002) indicam que o sistema supra citado tem permanecido ativo desde quando o nível do mar atingiu sua posição atual pela primeira vez, no Holoceno, por volta de 7.000 anos BP. Durante o máximo da transgressão holocênica (~5.900 anos BP), barreiras transgressivas ao longo da costa formaram o sistema ilha-barreiras e propiciaram uma sedimentação típica lagunar na paleocosta.

Mais recentemente, Leite (2007) estudou a influência do cisalhamento eólico na circulação costeira na região de Guamaré, utilizando modelagem matemática e simulação numérica a partir do sistema de modelos do SisBaHia, bem como evidenciou a atuação da forçante eólica sobre a dispersão de poluentes na plataforma continental interna ao largo da praia do Minhoto e no canal do Aratuá (sistema Galinhos-Guamaré).

Entretanto, ainda é deficiente a quantidade de estudos específicos, de média e grande escala temporal, sobre a influência dos projetos de carcinicultura e da indústria salina na região de Galinhos-Guamaré, principalmente no que se refere ao desencadeamento de processos erosivos e deposicionais, resultantes da alteração da hidrodinâmica local, das alterações morfológicas dos canais e das propriedades termohalinas, como consequência da supressão da cobertura de mangue, da construção de viveiros e bacias de sedimentação, da escavação de canais de abastecimento e de despesca/drenagem, da instalação de estações de bombeamento e do lançamento de efluentes.

Esta deficiência foi detectada durante a participação na equipe técnica que elaborou o Estudo de Impacto Ambiental/EIA e o Relatório de Impacto Ambiental/RIMA para a fazenda de criação de camarão da Camarus Aquicultura do Nordeste Ltda., onde fomos responsáveis pela elaboração de todos os documentos referentes ao Meio Físico, tais como o Diagnóstico Ambiental, Identificação e Avaliação dos Impactos Ambientais, Medidas Mitigadoras e Compensatórias, e os Programas de Acompanhamento e Monitoramento dos Impactos Ambientais.

Nesse sentido, foi proposta, à empresa Camarus, a realização de um estudo sobre a erosão nos seus dois canais escavados (canais de despesca/canais de drenagem/CDs), os quais são utilizados para o lançamento dos efluentes dos viveiros

no sistema Pisa Sal durante o processo de despesca, bem como a caracterização dos parâmetros físicos do sistema, de onde é bombeada a água para abastecer os seus viveiros.

Este estudo foi desenvolvido com suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico/CNPq através do Grant Pesquisador (proc. N° 350.881/1999-5 e 312275/2006-4) e da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda., bem como com o apoio do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica-PPGG/ UFRN, do Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha-GGEMMA/PPGG/UFRN, da Camarus e do Centro Federal de Educação Tecnológica do RN-CEFET/RN no que se refere à utilização de equipamentos e apoio logístico.

Este trabalho foi organizado em dez capítulos de forma a contemplar todas as temáticas inerentes ao referido estudo, a saber: Capítulo1 – Introdução: consta da apresentação, dos objetivos e da localização da área de estudo; Capítulo 2 - Estrutura Físico-Ambiental: aborda a estrutura geológica e geomorfológica regional e local, o clima e os agentes meteorológicos, a hidrografia e os agentes oceanográficos; Capítulo 3 - Materiais e Métodos: apresenta uma síntese dos materiais e métodos, cujo detalhamento está incluído nos capítulos aos quais estão relacionados; Capítulo 4 - Meteorologia da Região Adjacente ao Sistema Pisa Sal: trata da análise dos parâmetros meteorológicos coletados em uma estação instalada na área de influência deste estudo; Capítulo 5 - Batimetria, Geomorfologia e Formas de Leito do Sistema Pisa Sal: contempla análises sobre a variação de profundidade e da geomorfologia da calha e das margens dos canais, bem como a identificação e classificação das formas de leito; Capítulo 6 - Caracterização Faciológica e Textural do Sistema Pisa Sal, onde é apresentada a composição textural e faciológica do canal Pisa Sal e dos canais de despesca/drenagem escavados pela carcinicultura; Capítulo 7 - Correntes e Propriedades Termohalinas do Sistema Pisa Sal: consta da caracterização das correntes de marés (direção e velocidade), da temperatura, da salinidade e da densidade e suas variações verticais no domínio do tempo, análise do comportamento longitudinal e suas relações com a co-oscilação das marés; Capítulo 8 - Caracterização da Erosão no Sistema Pisa Sal: consta da caracterização dos pontos de erosão, da quantificação do volume erodido e da taxa de erosão, além da descrição dos agentes e feições erosivas; Capítulo 9 - Transporte de Sedimentos no Sistema Pisa Sal: apresenta a quantificação da carga de sedimentos transportados por arraste de fundo, em suspensão e carga total no canal Pisa Sal e nos canais de despesca/drenagem

escavados pela carcinicultura; por fim, o Capítulo 10 - Datação e Taxa de Sedimentação do Sistema Pisa Sal: apresenta a idade dos sedimentos e a taxa de sedimentação a partir dos métodos de ^{14}C e ^{210}Pb , respectivamente.

Em todos os capítulos construídos a partir de dados gerados por esta pesquisa, consta, ao final, uma discussão que integra as interpretações e as informações obtidas de pesquisas pretéritas realizadas na região e em outras partes do país. Estas discussões auxiliarão na formatação das Considerações Finais deste trabalho.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho teve o objetivo geral de caracterizar o comportamento das características físico-ambientais do sistema Pisa Sal, parte constituinte do complexo estuarino lagunar Galinhos-Guamaré.

Como objetivos específicos atingidos, destacam-se:

- Estudar a configuração batimétrica, a caracterização faciológica e a morfologia de fundo.
- Analisar e caracterizar o padrão de circulação das correntes de marés e das propriedades termohalinas.
- Mapear as zonas de erosão e sedimentação, quantificar o volume de material erodido e analisar suas relações com a hidrodinâmica.
- Analisar e quantificar o volume de transporte de sedimentos de fundo e em suspensão.
- Classificar o sistema Pisa Sal, segundo suas propriedades termohalinas.

1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região de Galinhos está localizada na Faixa Litorânea Norte de Escoamento Difuso, Sub-Bacia 15-4, ocupando uma área de $4.057,6 \text{ km}^2$, que representa 7,6 % da área do Estado, perfazendo um escoamento médio anual estimado de $65,64 \times 10^6 \text{ m}^3$ (SERHID, 1995).

A área objeto desse estudo localiza-se no litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte, sendo caracterizada por um complexo estuarino lagunar que ocupa parte dos municípios de Galinhos e Guamaré, estando compreendida entre as latitudes de $05^\circ 05' 15,6''$ e $05^\circ 07' 52,3''$ S e as longitudes $36^\circ 15' 30,0''$ e $36^\circ 17' 39,1''$ W, totalizando uma área de $19,2 \text{ km}^2$ (Figura 1.1).

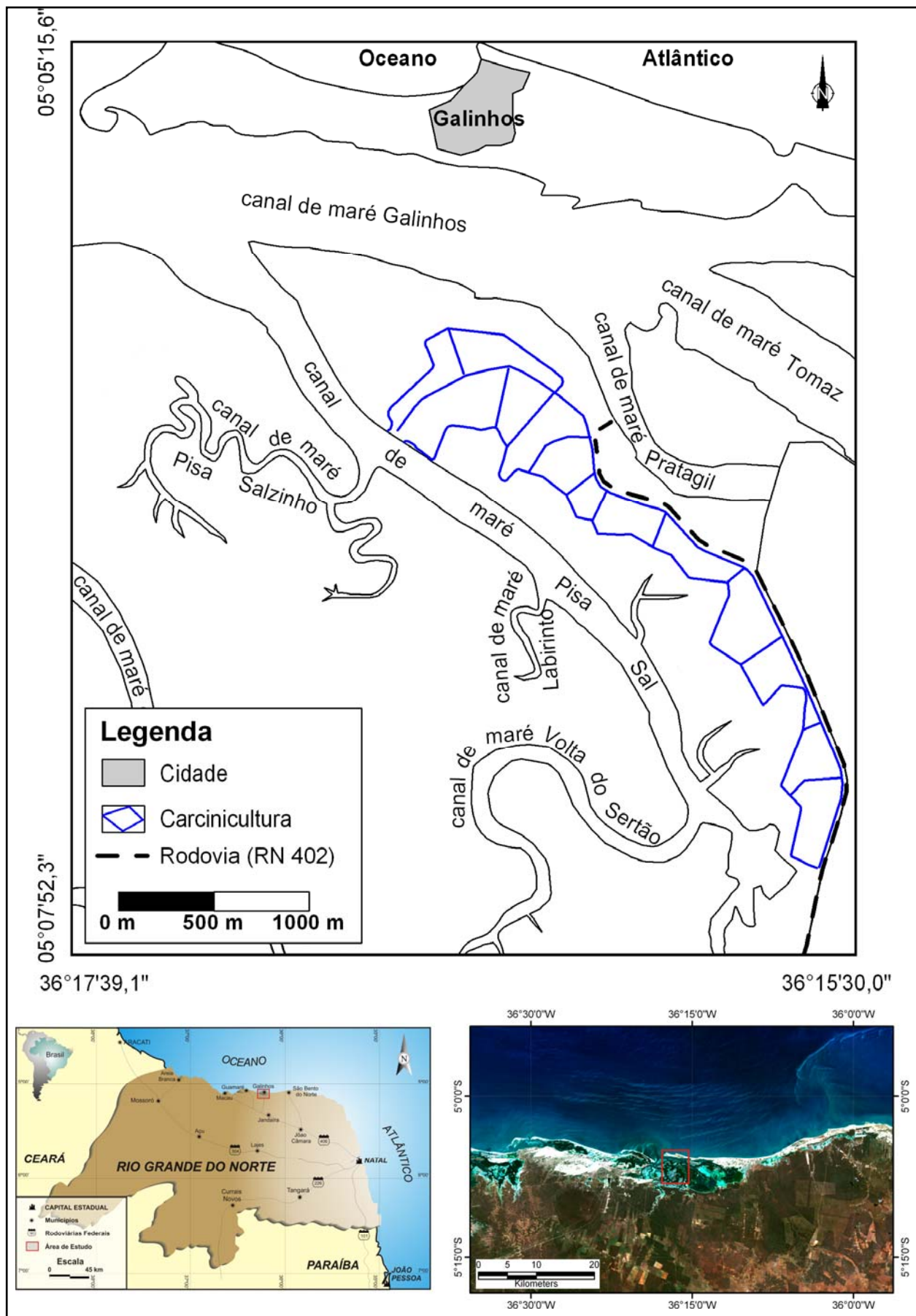


Figura 1.1. Mapa de localização da área de estudo inserida no município de Galinhos, litoral setentrional do Estado do RN.

2 ESTRUTURA FÍSICO-AMBIENTAL

2.1 ESTRUTURA GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICA REGIONAL

A área de estudo situa-se, regionalmente, na porção centro-norte da Bacia Potiguar que ocorre no estado do Rio Grande do Norte e parte do estado do Ceará, abrangendo uma área de 48.000 km², sendo 21.000 km² na porção emersa e 27.000 km² na porção submersa (plataforma e talude continentais) até a isóbata de 2.000 m.

Geologicamente, está situada na Província Borborema, apresentando seu embasamento cristalino constituído por rochas de idade pré-cambriana, representado pelo Complexo Caicó (gnaisses e migmatitos), pela cobertura metassedimentar do Grupo Seridó, que é constituído pelas Formações Jucurutu (paragneisses, mármore e calciossilicáticas), Equador (meta-arenitos e metaconglomerados) e Seridó (micaxistos e filitos), além de granitos e granodioritos brasileiros (Jardim de Sá, 1994).

2.1.1 Pré-Quaternário

Segundo Bertani *et al.* (1990), o arcabouço estrutural da Bacia Potiguar é constituído por três feições estruturais básicas: grabens (eixos NE-SW no continente e NW-SE na plataforma), altos internos e plataforma do embasamento, que foram desenvolvidas durante os estágios tectônicos de rifte, transicional e drifte, os quais controlaram a deposição das seqüências sedimentares desde o Neocomiano até o Terciário (Figura 2.1).

A fase rifte é caracterizada por sedimentação principalmente fluvial, lacustre e deltáica, caracterizando-se como uma seqüência continental, representada pela Formação Pendências. A fase transicional ocorre quando a Província Borborema sofre uma distensão N-S e a sedimentação *onshore* é finalizada. Essa fase é chamada de seqüência de proto-oceano por Asmuz e Guazelli (1981), posteriormente denominada de transicional por Souza (1982), em seguida, sustentada por Araripe e Feijó (1994), sendo representada pelos sedimentos deltáicos, lagunares e marinhos da Formação Alagamar. Por último, a fase drifte se estabelece, quando ocorreram os movimentos divergentes E-W das placas Africanas e América do Sul que permitiram a penetração do oceano, produzindo transgressões e regressões marinhas na Bacia Potiguar, depositando os sedimentos dos grupos Apodi e Agulha. Araripe e Feijó denominam essa fase de margem passiva.

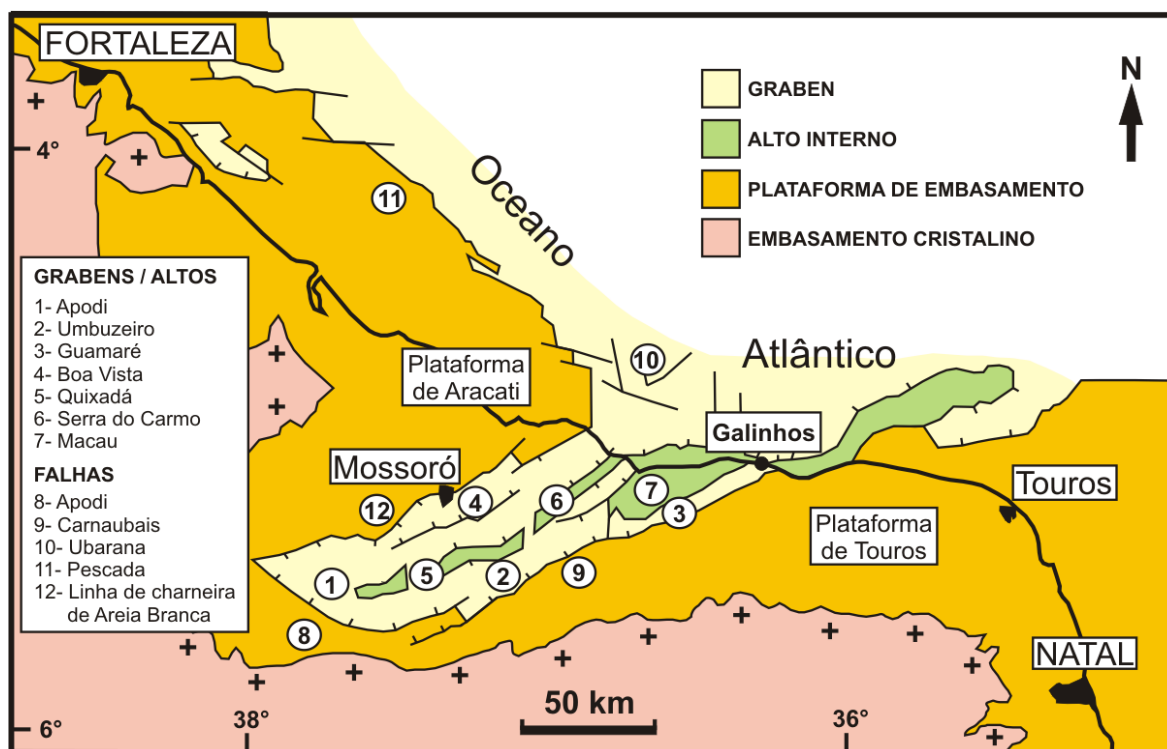


Figura 2.1. Arcabouço estrutural da Bacia Potiguar (modificado de Bertani *et al.*, 1990).

O arcabouço litoestratigráfico dos sedimentos da Bacia Potiguar proposto por Araripe e Feijó (1994) – uma atualização do trabalho de Sousa (1982), e Pessoa Neto *et al.* (2007) é representado pelos Grupos Areia Branca, Apodi e Agulha, além das rochas vulcânicas, do Grupo Barreiras e da seqüência quaternária (Figura 2.2). Das unidades supra citadas, somente as Formações Açú, Jandaíra, Macau, Tibau, Barreiras, Potengi e os sedimentos quaternários afloram na parte emersa da bacia.

O Grupo Areia Branca, com idade do Cretáceo inferior a médio é constituído pelas Formações Pendência (arenitos com intercalações de folhelho e siltito), Rio Ceará-Mirim (diques de diabásio toleítico), Pescada (arenitos com intercalações de folhelho e siltito) e Alagamar (arenitos, folhelhos, calcarenito e calcilutito ostracoidais). As rochas do Membro Aracati, descritas por Souza (1982) e incluídas no Grupo Areia Branca, atualmente fazem parte da Formação Açú.

O Grupo Apodi, com idades do Cretáceo médio a superior é constituído pelas Formações Açú (arenitos intercalados com folhelhos, siltitos e argilitos), Ponta do Mel (calcarenito oolítico, doloespárito e calcilutito com camadas de folhelho), Quebradas (arenito, folhelho e siltito) e Jandaíra (calcarenito bioclástico a foraminífero bentônicos e algas verdes, e calcilutito com marcas de raízes, dismicrito e gretas de contração). A

Formação Serra do Cuó apresenta diques de diabásio com idades em torno de $93,1 \pm 0,8$ m.a (Cretáceo superior). (Pessoa Neto, *et al.*, 2007).

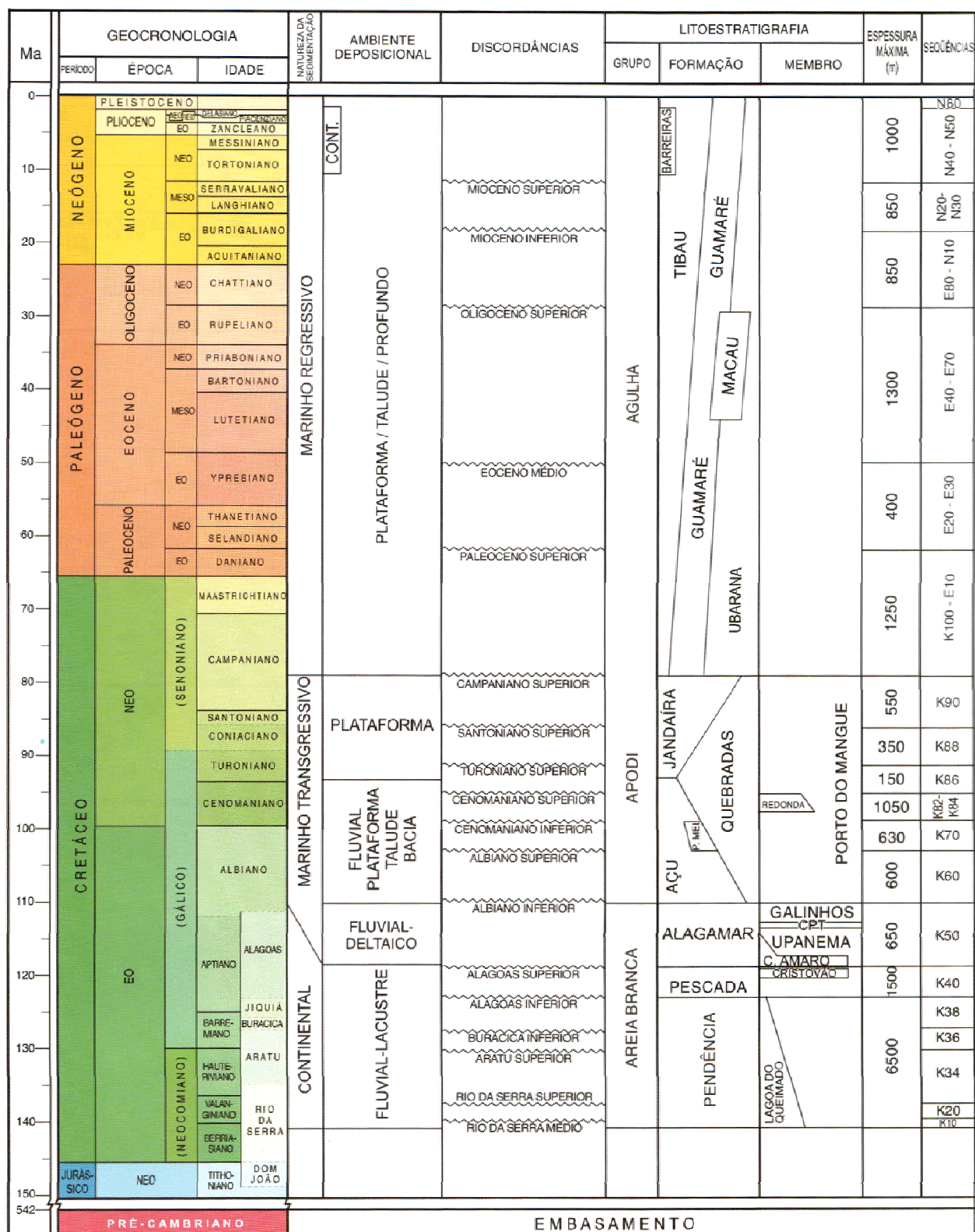


Figura 2.2. Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

O Grupo Agulha, com idades do Cretáceo superior ao Terciário superior, é constituído pelas formações Ubarana (folhelho e argilito, intercalados por arenitos, siltito e calcarenito), Guamaré (calcarenito bioclástico com intercalações de calcilutito, folhelho e arenito) e Tibau (arenito quartzoso grosso a conglomerático com intercalações de calcarenito e argila) e Barreiras (arenitos quartzosos a sub-arcosianos, com intercalações de níveis de argila, silte e conglomerados). Derrames de olivina basalto da Formação Macau com idades entre 45 e 29 m.a. (Terciário médio) ocorrem intercalados no Grupo Agulha.

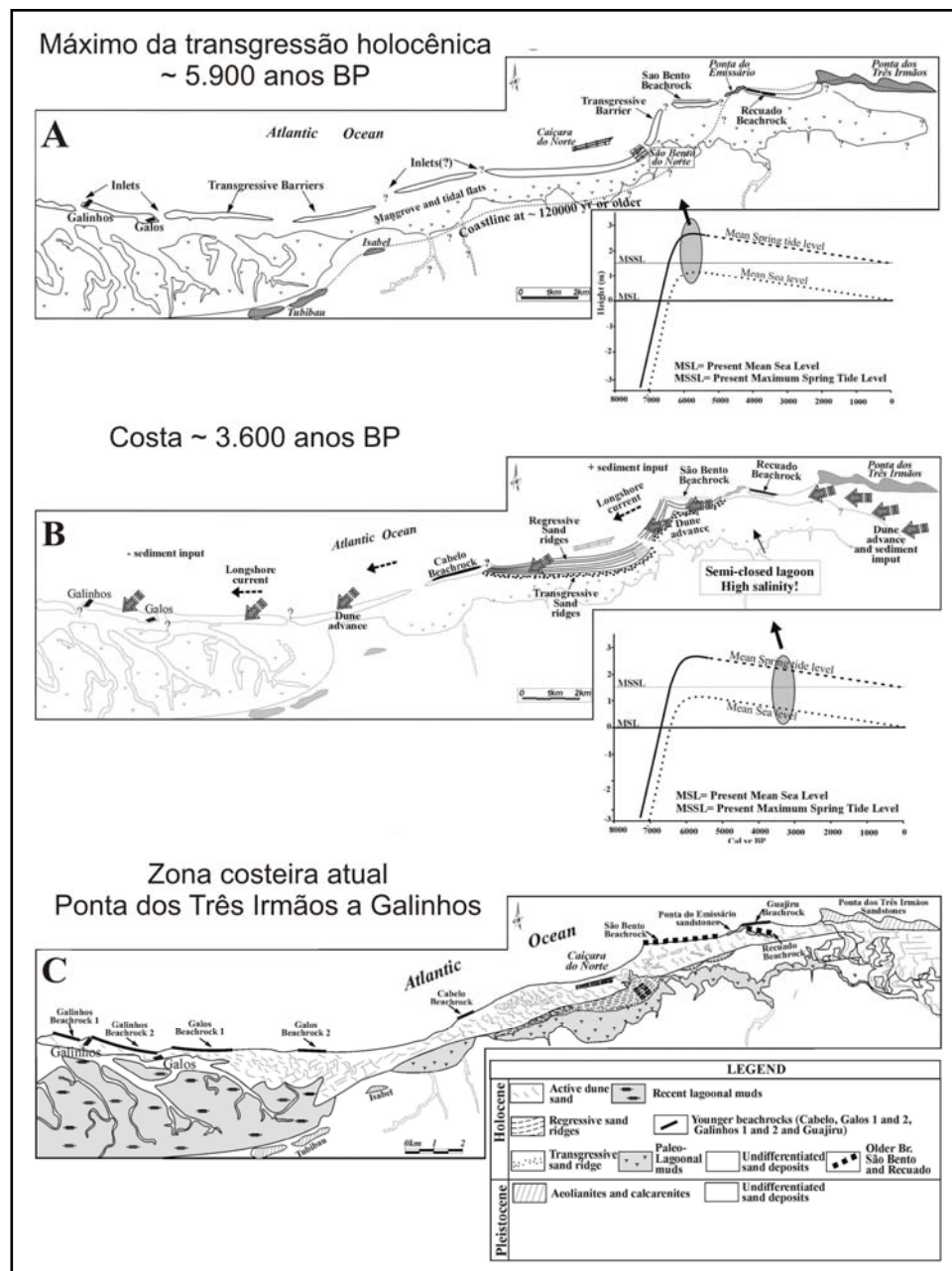
Após uma revisão ampla dos dados disponíveis sobre a estratigrafia do Grupo Barreiras (Mabessone *et al.*, 1972 e Mabessone e Castro, 1975) na região Nordeste do Brasil, Mabessone *et al.* (1991) e Alheiros e Lima Filho (1991), agruparam esses sedimentos juntamente com os sedimentos da Formação Potengi (Campos e Silva, 1966), sob a denominação de Formação Barreiras. A Formação Potengi (Campos e Silva, 1966; Bigarella, 1975; Vilaça, 1986; Nogueira *et al.*, 1984) repousa, predominantemente, sobre a Formação Guararapes, formando uma cobertura aplainada constituída por areias quartzosas inconsolidadas, de granulometria média a grossa, com pouca argila, pequenos seixos de quartzo e limonita de cor amarelo-avermelhado. Sua idade é bastante questionável, entretanto pode-se assumir uma idade posterior ao Terciário Superior, uma vez que repousam sobre as rochas do Grupo Barreiras. A origem desses sedimentos está associada ao retrabalhamento das rochas do Grupo Barreiras e das dunas pela ação do vento e do escoamento difuso das águas pluviais (IDEMA, 1994).

No contexto geomorfológico, as rochas da Formação Barreiras são correlacionados à Superfície de Tabuleiro Costeiro ou Superfície de Tabuleiro Litorâneo definida por Mabessone e Castro (1975) formada pela justaposição de depósitos sedimentares, separados por discordância erosiva, as quais representam a alternância de períodos climáticos úmidos para semi-árido, resultando numa superfície topográfica plana a suavemente ondulada, com cota média em torno de 60 m.

2.1.2 Quaternário

Estudos realizados por Caldas *et al.* (2006a) baseados em perfis de radar (GPR), sondagens *vibracore*, sondagens hidrogeológicas e datação radiocarbono indicam a presença de um sistema de barreiras transgressivas e regressivas holocênicas no litoral norte do estado, entre os municípios de São Bento do Norte e

Galinhos. Segundo Caldas *et al.* (2006b), o modelo evolutivo dessa região indica a deposição de uma barreira transgressiva, onde uma laguna se desenvolveu atrás dessa barreira durante o nível de mar alto no Holoceno; ainda, segundo este autor, o nível do mar alcançou, pela primeira vez, o nível atual em aproximadamente 6.700 cal. anos BP, cerca de 300 anos ou mais cedo que em outras curvas para o litoral brasileiro, como a curva de Salvador proposta por Suguio *et al.* (1985) e o máximo da transgressão ocorreu entre 5.940 a 5.900 cal. anos BP, atingindo uma altura máxima na maré de sizígia de 1,3 m em relação ao nível médio do mar atual (Figura 2.3).



Figuras 2.3. Morfologia da zona costeira durante o máximo da transgressão holocênica em aproximadamente 5.900 anos BP (A), paleogeografia da costa em 3.600 anos BP durante a regressão do nível do mar (B) e geologia e morfologia da costa atual entre a Ponta dos Três Irmãos e Galinhos (Modificado de Caldas, 2002).

Em seguida, com o abaixamento do nível do mar, inicia-se a deposição de uma barreira regressiva em aproximadamente 3.600 cal. anos BP, quando os canais de marés tornaram-se estreitos devido ao transporte de sedimentos ao longo da costa pelas correntes de deriva litorânea e o alarguecimento da face de praia que favoreceu o transporte de grande quantidade de sedimentos pelos ventos E-NE, formando extensos depósitos eólicos em direção ao embaçamento situado a W da área (Caldas *et al.*, 2006a) (Figura 100B). Ainda durante essa fase, canais de marés foram fechados e a laguna foi isolada do mar aberto (Figura 2.3). Segundo Caldas *et al.* (2006a e 2006b), Stattegger *et al.* (2003) e Caldas (2002), o sistema tem permanecido ativo desde quando o nível do mar atingiu sua posição atual pela primeira vez no Holoceno.

Por sua vez, Bezerra *et al.* (2003 e 1998), estudando a variação do nível do mar no Holoceno, em aproximadamente 300 km de litoral no estado do Rio Grande do Norte, entre os municípios de Baía Formosa (litoral Leste) e Areia Branca (litoral Norte), a partir de datações de radiocarbono em indicadores biológicos (bivalves em posição de vida, vermetídeos, ostras, recifes de corais e turfas), assembléias mortas de moluscos em rochas de praias (*beach rocks*) e planícies de marés (*tidal flats*) e turfa, indicam, a partir de uma curva envelope do nível do mar, que, aproximadamente entre 7.100 a 5.800 cal. anos BP, ocorreu uma subida relativamente rápida do nível do mar que alcançou o seu máximo em 5.000 cal. anos BP, alcançando entre 2,5 a 4,0 m acima do nível do mar atual, provocando um recuo geral da linha de costa na região. Em seguida, o nível do mar caiu rapidamente e uma nova elevação ocorreu entre 2.100 e 1.100 cal. anos BP, causando o segundo recuo da linha de costa no Holoceno.

A sedimentação quaternária ao longo do litoral Norte do estado do Rio Grande do Norte é representada pelos depósitos de arenitos de praia (*beachrock*), pontais arenosos (*spits*), ilhas barreiras, flúvio-estuarino, planícies de inundação e de maré, praias e dunas (fixas e móveis), os quais estão inseridas na unidade geomorfológica Planície Costeira que é formada pela interação de fatores climáticos, litológicos, tectônicos, oceanográficos e variações do nível do mar durante as épocas pré-holocênica e holocênica, como produto da erosão e acreção contínua ao longo do tempo.

2.2 ESTRUTURA GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICA LOCAL

A área de estudo é formada por uma seqüência sedimentar do Terciário e uma Seqüência Quaternária conforme Silva *et al.* (2005), Costa Neto *et al.* (2004a), Lima (2004) e Camarus (2003) (Figura 2.4).

2.2.1 Pré-Quaternário

A Seqüência Pré-Quaternária é representada pela Formação Barreiras (Terciário) que ocorre a Sul da área de estudo, sendo constituída por arenitos argilosos com níveis conglomeráticos ferruginosos, mal selecionados, cor amarelo-avermelhada, inserida na unidade geomorfológica dos Tabuleiros Costeiros (relevo plano a suavemente ondulado, com cotas variando de 12 a 34 m) e que representa o limite continental da Planície Costeira. Sobre essas rochas, repousam as areias quartzosas inconsolidadas, de granulometria média a grossa, com pouca argila, pequenos seixos de quartzo e limonita de cor amarelo-avermelhado da Formação Potengi (Camarus, 2003 e Costa Neto *et al.*, 2004a).

2.2.2 Quaternário

O complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré desenvolveu-se atrás de um sistema de antigas ilhas barreiras com orientação aproximadamente E-W, em um litoral aberto, com regime de mesomaré e dominado por ondas, o qual foi estudado por Lima *et al.* (2006a, 2006b, 2004, 2002 e 2001). Lima (2004) identifica a presença dos seguintes depósitos sedimentares: arenitos praias (*beachrocks*), depósitos de areias de praia, depósitos de dunas fixas e móveis, depósitos de intermaré, depósitos de mangue e ondas arenosas (*sandwaves*). Outros estudos mostram que os principais mecanismos de modelamento da referida laguna e da costa adjacente são as correntes de deriva litorânea, correntes de marés e as ondas, que continuam atuando fortemente até hoje (Santos *et al.*, 2003; Chaves, 2006; Chaves e Vital, 2001 e Silveira *et al.* 2006).

Nesse trabalho, a Seqüência Quaternária é constituída por rochas de praia (*beachrocks*), arenitos estuarinos, depósitos flúvio-estuarinos, depósitos de marés, depósitos de deltas de maré vazante, depósitos de pontais arenosos, depósitos atuais de praias e depósitos eólicos.

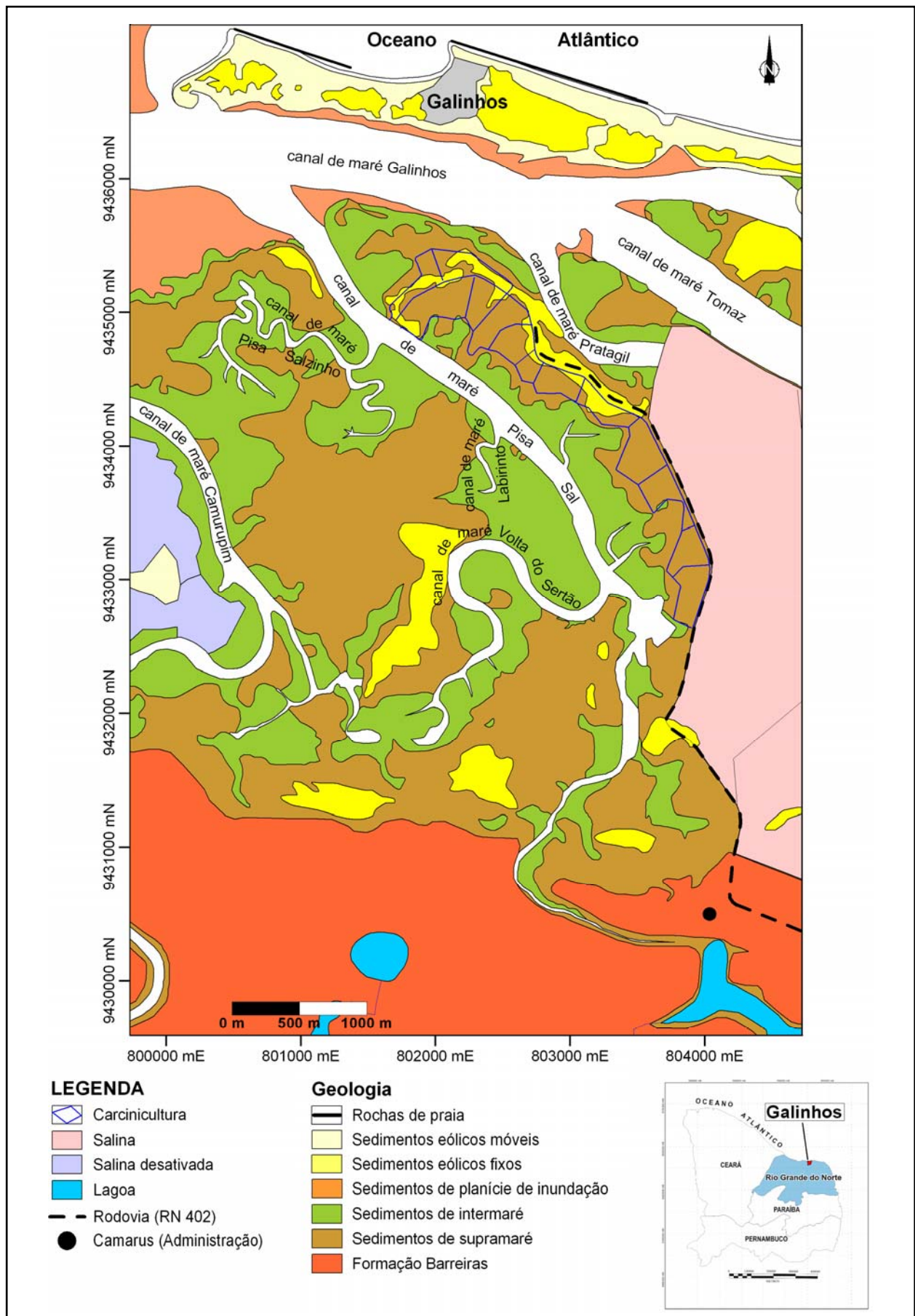


Figura 2.4. Mapa geológico da região do sistema Pisa Sal, litoral Norte do estado do Rio Grande do Norte (modificado de Camarus, 2003).

Os arenitos de praia são constituídos por areia grossa a fina com níveis conglomeráticos, mal selecionados, consolidados por cimentação carbonática e/ou aragonítica, apresentando estratificação plano paralela, cruzada e festonada, o que indica antigas zonas de estirâncio (ECOPLAN, 2000), os quais são geomorfologicamente correlacionados a recifes. Essa unidade ocorre como uma linha de recife alongada e paralela à linha de praia. Segundo Lima (2004), esses arenitos estão relacionados às flutuações do nível do mar durante a última transgressão e regressão marinha subsequente. Bezerra *et al.* (2003 e 1998) a partir de datações de radiocarbono em conchas de moluscos no *beachrock* em frente à cidade de Galinhos indicam idade de 3.680 - 3.210 cal anos BP. Da mesma forma, Caldas *et al.* (2006a e 2006b) estudando conchas de bivalves por radiocarbono em *beachrocks* na cidade de Galinhos-RN, obtiveram a idade máxima para início da deposição entre 3.240 - 3.140 cal anos. Beachrocks com idades entre 2.390 - 2.340 cal anos BP são encontrados na praia de Galos (Galinhos-RN).

Os arenitos estuarinos são formados, predominantemente, de areias finas e silte, semiconsolidados a consolidados por cimentação carbonática e/ou aragonítica, podendo ocorrer grandes concentrações de fragmentos de calcários e conchas. Esses sedimentos são encontrados nas bordas dos canais de marés, formando terraços aflorantes ou recobertos por areia holocênicas (ECOPLAN, 2000). Um afloramento desse arenito é encontrado na margem esquerda do rio Pratagil, próximo ao porto do Pratagil e na margem esquerda do rio Pisa Sal, próximo a sua foz.

Os depósitos flúvio-estuarinos são constituídos por areias, areias lamosas de composição quartzosa e biodetrítica, mal selecionadas, formando barras arenosas na desembocadura do estuário e nas planícies de marés, na forma de terraços flúvio-estuarinos formados em níveis de mar mais elevado que o atual, mostrando atualmente superfícies horizontais ou levemente ondulados, em que se desenvolve uma cobertura vegetal de caatinga. Estudos sedimentológicos desenvolvidos por Costa Neto *et al.* (2004a), a partir de 14 furos a trado manual, caracterizam estes sedimentos como areias com textura variando de média a muito fina, pobre a moderadamente selecionados, permeabilidade maior que 10^{-3} cm/s, espessura de aproximadamente 2,05 m, a profundidade do nível freático variando de 0,60 a 1,75 m; os teores de carbonato e matéria orgânica variam entre 1,5 a 2,5 % e 1,5 e 3,0 %, respectivamente.

Os depósitos de marés são caracterizados por uma seqüência sedimentar constituída de areias, areias lamosas, lamas arenosas e lamas, depositadas pelo

movimento das marés, onde ocorrem os ecossistemas de manguezal e apicun, e são classificados em depósitos de supramaré e intermaré, os quais são, geomorfologicamente, correlacionados às planícies de supramaré e intermaré, respectivamente (Figura 2.5). Depósitos de areias grossas e lamas com grandes quantidades de bivalves e gastrópodes ocorrem no centro de pequenos canais de marés (zona de inframaré) que cortam as planícies de intermaré e supramaré, apresentando largura na ordem de 1,0 a 5,0 m e profundidade inferior a 1,0 m.



Figura 2.5. Planície de supramaré (Ps) ocupada por viveiros, canais de drenagem (CD1 e CD2) e salinas, e planície de intermaré (Pi) ocupada por manguezal, bancos areno lamosos e salinas (Foto: Bruno Madruga, 2002).

Os sedimentos de supramaré são depositados pela ação das marés de sizígia e apresentam composição que varia de areno siltica a argilosa, gretas de contração, crostas de sais e uma cobertura de tapetes de algas. Os sedimentos de intermaré são depositados entre o limite mínimo e máximo das marés médias, sendo constituídos por argila, silte e argila arenosa, com grande quantidade de matéria orgânica, onde se desenvolve importante cobertura de manguezal. Na zona de intermaré também ocorrem bancos areno lamosos, bem como deltas de marés vazante formados por depósitos de argila e areia fina que afloram durante a maré-baixa e ocorrem na foz do complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré.

Estudos realizados por Caldas (2002) no complexo estuarino lagunar de Galinhos Guamaré a partir de sondagens a *vibro core* (VCGAL-7, VCGAL-8 e VCGAL-

3) (Figura 2.6) mostram que o referido complexo é constituído principalmente por lama e areia fina interestratificadas, ambas apresentando laminação paralela como principal estrutura sedimentar. Essas estruturas variam de laminação plano-paralela, nos sedimentos mais finos, a estratificação cruzada, nos sedimentos mais grossos. Matéria orgânica (restos de madeira, folhas e turfas), clastos de lama e conchas em posição de vida, ocorrem principalmente nas fácies mais finas.

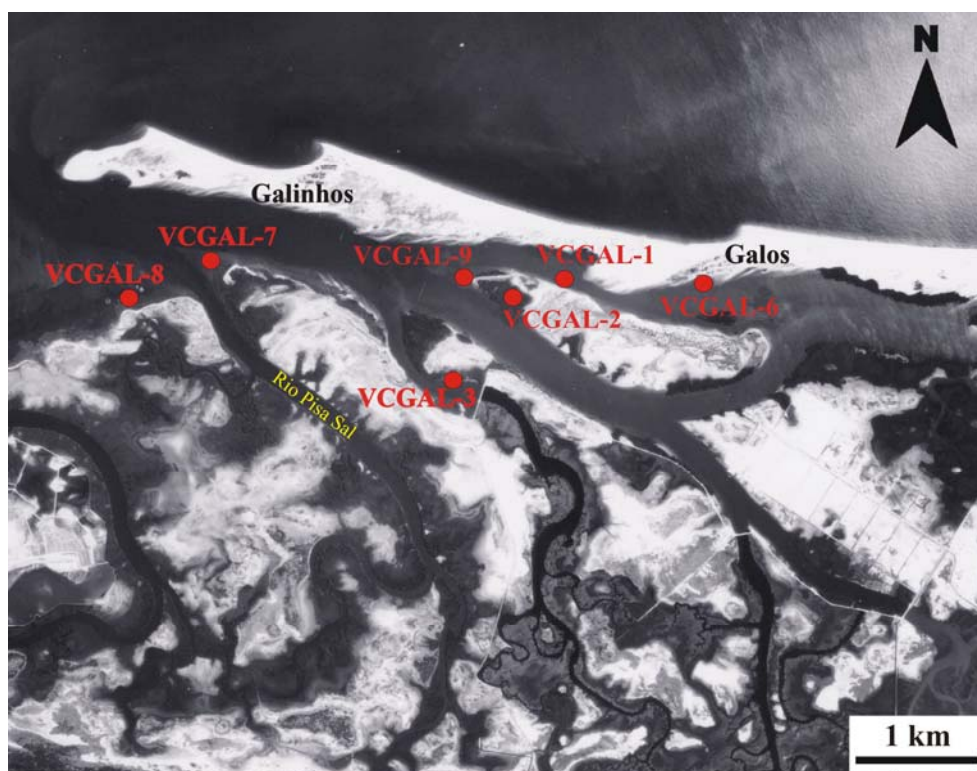


Figura 2.6. Fotografia aérea de 1988, mostrando a localização dos *vibro-core* no complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guararé (Modificado de Caldas, 2002).

Assim, Caldas (2002) classificou os sedimentos em três fácies sedimentares: Fácies A, Fácies D e Fácies E (Figura 2.7). A fácies A refere-se aos depósitos de planície de maré (*tidal flat deposits*) constituídos por argila cinza verde escura com camadas orgânicas de cor oliva escura. Camadas de areia muito fina, cinza-esverdeada, ocorrem intercaladas nas argilas. Ocorrem também conchas em posição de vida, fragmentos de conchas e clastos de lama. Estes depósitos são impermeáveis e atingem a partir da cota zero uma profundidade mínima de - 4 metros (Figura 2.7), o que impede a infiltração de água e, conseqüentemente, a contaminação dos aquíferos profundos. A fácies D refere-se aos depósitos de barra de pontal de canais de marés (*tidal channel point bar deposits*), que apresentam depósitos de acreção lateral que

acompanham a migração do canal em direção à porção mais distal do banco. Essa fácies é representada por laminações de lama e argila distinguidas pelo contraste entre o tamanho dos grãos. A base desta fácies é, geralmente, composta por areia média a grossa, cinza-esverdeada, que grada para argila cinza verde escura ou oliva escura. Estratificação cruzada é comum nas areias mais grossas. A fácies E refere-se aos depósitos de canais de marés, os quais são constituídos por areia média a grossa pobremente selecionada, cor cinza amarelada, com estratificação cruzada e clastos de lama no topo (Figura 2.7).

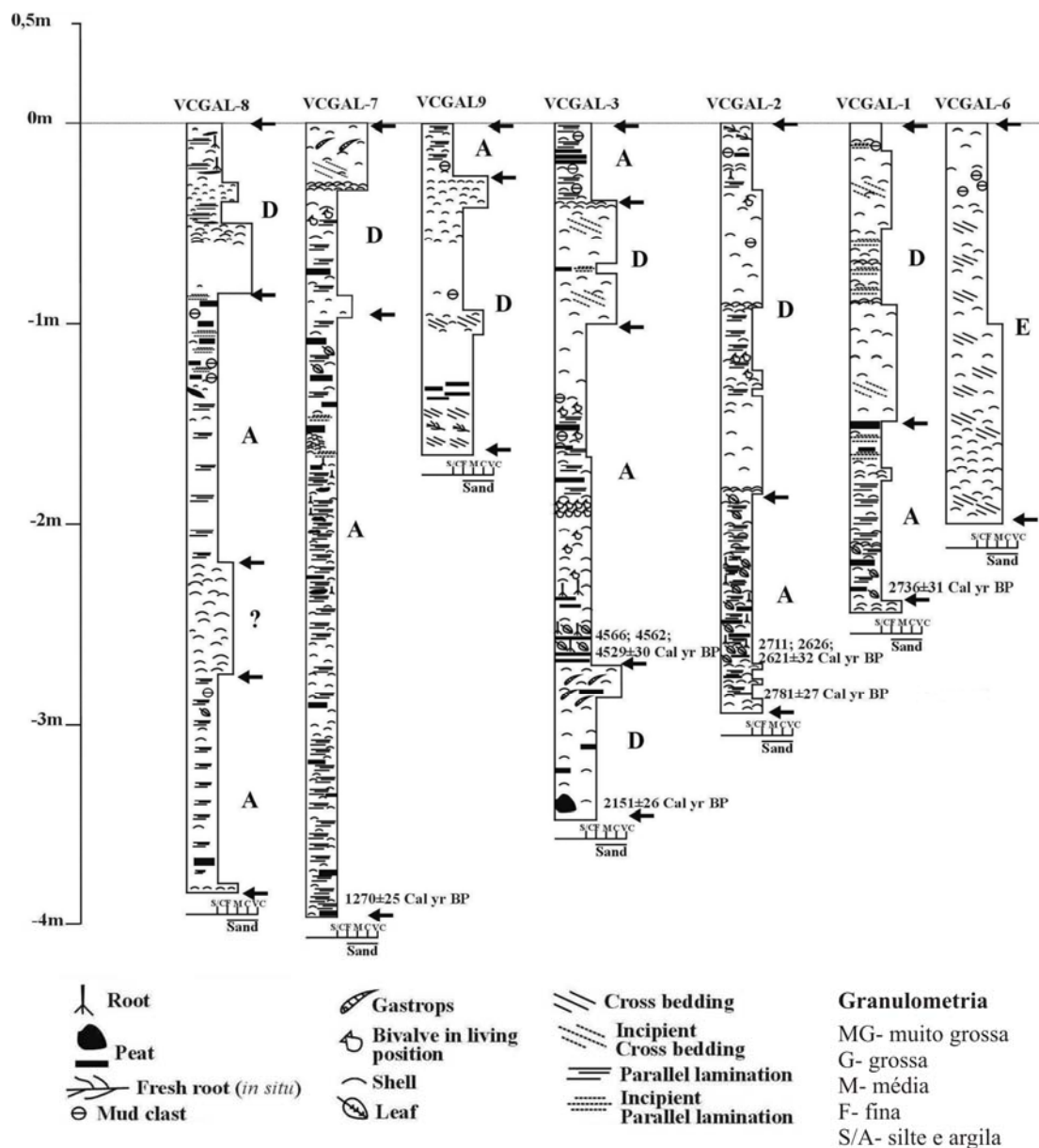


Figura 2.7 Fácies sedimentares (letras entre as setas no lado direito do perfil), variação do tamanho do grão, estruturas sedimentares e idades radiocarbono AMS das amostras das sondagens de *vibro-cores* no sistema de canais e planícies de marés no município de Galinhos/RN (VCGAL-3, VCGAL-7 e VCGAL-8). Fácies A = planície de maré; D = barra de pontal de canal de maré; E = canal de maré (Adaptado de Caldas, 2002).

Na área da fazenda de criação de camarões da Empresa Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda., localizada no município de Galinhos/RN, foram realizados estudos sedimentológicos nos ambientes de planície de supramaré e terraços flúvio-estuarinos, a partir de 14 sondagens a trado manual com profundidades variando entre 0,55 a 2,05 m. Esses estudos permitiram identificar 9 fácies texturais, a saber: Areia média, Areia fina, Areia média siltosa, Areia fina siltosa, Areia fina lamosa, Areia muito fina siltosa, Areia muito fina lamosa, Silte arenoso e Turfa (Camarus, 2003).

Foi possível estimar da permeabilidade (k) dos sedimentos (Tabela 2.1), exceto da fácies turfa, a partir de amostras deformadas, utilizando a classificação granulométrica, a determinação do Limite de Liquidez (LL), do Limite de Plasticidade (LP) e do Índice de Plasticidade (IP), segundo o Sistema Unificado para Classificação de Solos proposto em 1953 pela Waterways Experiment Station da U.S. Corps of Engineers.

Tabela 2.1. Fácies texturais e respectivas permeabilidades dos sedimentos da área da fazenda de criação de camarão da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda. (Camarus, 2003).

Fácies Sedimentares	K (cm/s)
1- Areia média	$\geq 10^{-3}$ a 10^{-6}
2- Areia fina	$\geq 10^{-3}$ a 10^{-6}
3- Areia média siltosa	10^{-3} a 10^{-6}
4- Areia fina siltosa	10^{-3} a 10^{-6}
5- Areia fina lamosa	10^{-3} a 10^{-6}
6- Areia muito fina siltosa	10^{-3} a 10^{-6}
7- Areia muito fina lamosa	10^{-6} a 10^{-8}
8- Silte arenoso	10^{-6} a 10^{-8}

A profundidade do nível freático ocorre entre 0,30 e 1,75 m, com presença de alto grau de salinização, devido à influência constante da penetração das marés. O grau de selecionamento variou entre pobremente selecionado (60,0 %), muito pobremente selecionado (23,6 %), moderadamente selecionado (14,6 %) e bem selecionado (1,8 %). O teor de carbonatos variou entre 1,25 % e 65,0 %. A quantidade de matéria orgânica oscilou entre 1,0 % e 13,0 %.

A maioria das sondagens está localizada na zona de planície de supramaré, onde mostram uma sucessão sedimentar caracterizada por uma camada de topo que varia de areia fina ($k > 10^{-3}$ cm/s) a areia muito fina lamosa ($k = 10^{-6}$ a 10^{-8} cm/s), de composição quartzo-biodetrítica, espessura variando entre 0,28 e 0,71 m e uma

camada basal de silte arenoso ($k = 10^{-6}$ a 10^{-8} cm/s) com espessura variando de 0,22 a 1,32 m. Os sedimentos da planície de intermaré mostram uma fina camada de topo, com espessura média de 0,30 m, constituída de areia lamosa muito pobremente selecionada, com permeabilidade variando de 10^{-3} a 10^{-6} cm/s. A camada de base é constituída de silte arenoso com permeabilidade de 10^{-6} a 10^{-8} cm/s, teores de matéria orgânica e carbonato variando de 5 a 10 % e 33 a 40 %, respectivamente. O alto teor de carbonato deve-se à grande concentração de conchas de bivalves e partículas biotécnicas. O nível freático ocorre em profundidade de 0,50 a 0,70 m.

Os deltas de maré vazante são feições de relevo plano a suavemente ondulado, formadas nas desembocaduras dos estuários pela ação das correntes de marés de vazante e afloram durante o período de baixa-mar. São constituídos por lamas e areias lamosas de composição quartzosa e biotécnica, mal selecionadas e de origem flúvio-estuarina-costeira. Os deltas de maré vazante sofrem modificações constantes na sua forma em função da variação da amplitude da maré, do aumento na vazão do estuário, da variação das correntes de marés e do aumento no aporte fluvial de sedimentos. Essa feição é observada na foz do complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré.

Os pontais arenosos (*spit*) são formas de relevo caracterizadas por um corpo alongado, paralelo à linha de costa, originado do transporte de areias costeiras pelas correntes de deriva litorânea. Na área de estudo, essa feição apresenta migração para W, sendo representada pela península de Galinhos e pela ponta do Capim Açú (Guamaré). Lima (2004) estudando três perfis transversais ao pontal de Galinhos/RN, os quais foram denominados de Perfil A (Distrito de Galos, extremo E), Perfil B (Em frente a cidade de Galinhos) e Perfil C (Farol de Galinhos) no período de dezembro de 1999 a agosto de 2001, concluiu que, no Perfil A, ocorreu deposição de sedimento da ordem de $1,4 \text{ m}^3/\text{m}$, enquanto nos Perfis B e C, houve erosão na ordem $3,8$ e $2,0 \text{ m}^3/\text{m}$, respectivamente. Silveira (2002), estudando o litoral do município de Guamaré/RN mapeou ilha arenosa da ponta do Amaro/ponta do Capim Açú (extremo oeste da área) e classificou-a como uma ilha barreira.

Os depósitos atuais de praias são constituídos por areias quartzosas, fragmentos de conchas (biotécnicos) e minerais pesados. Apresentam granulometria fina a grossa, bem selecionada. Localmente, podem recobrir os arenitos de praia. Esses sedimentos são geomorfologicamente relacionados à zona de estirâncio (faixa de praia exposta entre o limite de preamar e baixa-mar). Segundo Lima (2004), na área

de estudo, essa feição apresenta em média 130 m de largura, exceto na praia de Galos, onde atinge a largura máxima de 50 m.

Os depósitos eólicos são formados por sedimentos eólicos fixados por vegetação e sedimentos eólicos móveis. Os primeiros, geomorfologicamente correlacionados às dunas fixas, são constituídos por areias quartzosas, granulometria fina a média, cor amarelo-claro a creme, bem selecionadas, subarredondadas a arredondadas, com cobertura vegetal de gramíneas e arbustos espaçados que ocorrem na península de Galinhos. As areias dos terraços estuarinos foram transportadas pelo vento e depositadas sob a forma de dunas, que apresentam, atualmente, uma cobertura vegetal constituída por gramíneas e cactáceas. Essa Unidade ocorre a Sul do porto do Pratagil e, na margem esquerda, próximo à foz do rio Pisa Sal. Os sedimentos eólicos móveis, cuja geomorfologia é de dunas móveis, são constituídos por areia quartzosa, fragmentos de conchas e níveis de minerais pesados. Possuem granulometria fina, bem selecionada, formando um relevo de dunas, sem cobertura vegetal, que ocorre nas proximidades do distrito de Galos. Esses sedimentos também constituem a planície de deflação que ocorre no trecho entre o distrito de Galos até à região do farol de Galinhos (extremo Leste da península de Galinhos). Segundo Lima (1993), dunas móveis são encontradas desde o distrito de Galos até à ponta da península de Galinhos.

2.3 CLIMA E AGENTES METEOROLÓGICOS

O trabalho desenvolvido por Cestaro (1994) a partir de dados de estações meteorológicas e postos pluviométricos em municípios vizinhos a Galinhos-RN (estação meteorológica do município de Macau e postos pluviométricos dos municípios de Guamaré, Pedro Avelino, Jandaíra e São Bento do Norte), no qual o autor analisou os principais elementos do clima (temperatura, insolação, nebulosidade, índice pluviométrico, umidade relativa e velocidade e direção dos ventos), permitiu caracterizar o clima no Município de Galinhos-RN.

2.3.1 Clima

O clima para a região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo BSw^h, definido como um clima seco, muito quente e com a estação chuvosa no verão, atrasando-se para o outono.

Segundo a classificação de Gaussen, a região apresenta o clima tipo 4aTh, definido como um bioclima tropical quente de seca acentuada, com 7 a 8 meses secos e índice xerotérmico bastante elevado, entre 150 a 200 (Galvão 1967 *apud* Cestaro, 1994).

O clima local apresenta intensa insolação, temperaturas elevadas e ventos fortes e constantes. As precipitações ocorrem durante curto período de tempo com grandes variações temporais e espaciais (Cestaro, *op cit*).

2.3.2 Insolação e Nebulosidade

A insolação média diária para a série histórica de 1961-1990, registrada na Estação Meteorológica de Macau, equivale a 7,1 horas. O período de fevereiro a julho apresenta as menores médias diárias de incidência da luz do sol sobre a superfície terrestre, que oscilam entre 6,2 a 6,7. Já o período de agosto a setembro apresenta as maiores médias diárias, entre 7,7 a 8,3 (Cestaro, 1994) (Figura 2.8).

A região de Galinhos apresentou, no período de 1961 a 1990, uma nebulosidade média anual de 53 %, caracterizando uma distribuição aproximadamente constante ao longo do ano (Figura 2.8).

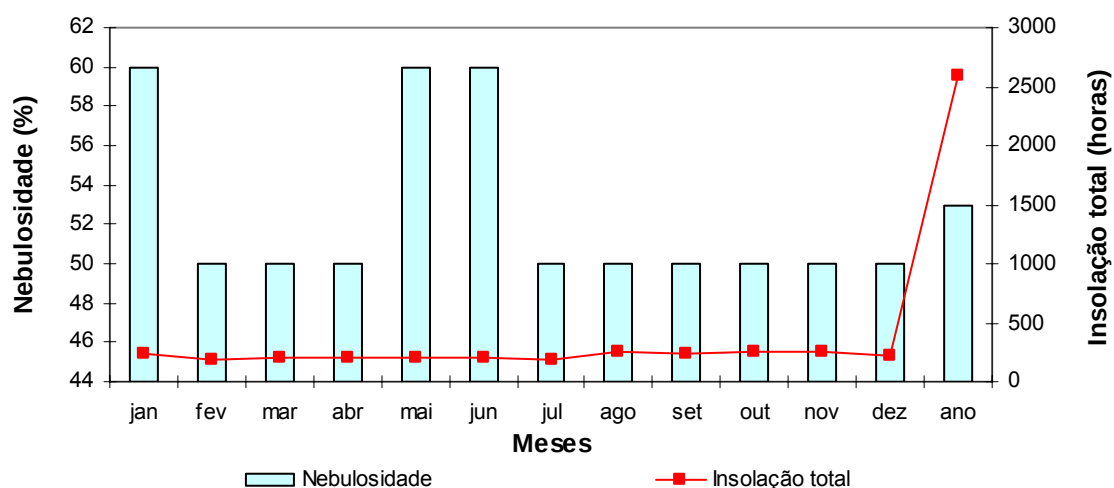


Figura 2.8. Médias mensais e anual da nebulosidade e da insolação total para a região de Galinhos-RN, durante o período de 1961 a 1990, a partir de dados da Estação Meteorológica de Macau-RN (Adaptado de Cestaro, 1994).

2.3.3 Temperatura

A temperatura no município de Galinhos-RN, segundo Cestaro (1994), sofre influência da baixa latitude, da proximidade com o mar e das baixas altitudes, o que

provoca a sua elevação e faz com que apresente pequena variação ao longo do ano: em torno de 3,6 °C de amplitude.

A temperatura média anual normal medida na estação meteorológica de Macau, durante o período de 1961 a 1990 é de 26,8 °C. A menor temperatura média mensal foi de 25 °C e ocorreu em julho, enquanto, em fevereiro, ocorreu a maior temperatura média mensal com 28,6 °C. A média anual das temperaturas máximas foi de 31,1 °C e das mínimas, de 22,1 °C. A temperatura máxima absoluta de 36,8 °C ocorreu em 27 de fevereiro de 1975 e a mínima absoluta de 17,3 °C ocorreu em 13 de julho de 1968 (Figura 2.9).

As temperaturas máximas maiores e as mínimas menores ocorrem mais para o sul do município, zona em que diminui a influência direta do mar e predomina a cobertura vegetal de caatinga.

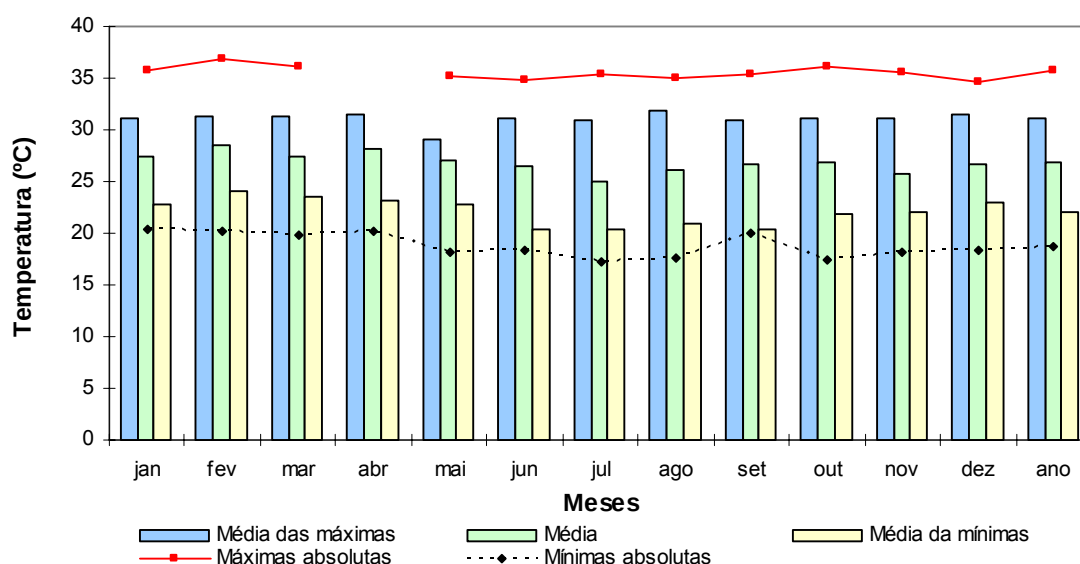


Figura 2.9. Médias mensais e anual da temperatura (máxima absoluta, média das máximas, média, média das mínimas e mínimas absolutas) para a região de Galinhos-RN, durante o período de 1961 a 1990, a partir de dados da Estação Meteorológica de Macau-RN (Adaptado de Cestaro, 1994).

2.3.4 Vento

Os ventos na região Nordeste do Brasil são controlados pelo movimento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que se desloca de Norte a Sul com as mudanças de estações. A ZCIT é uma ampla região onde confluem os ventos alísios de Nordeste e Sudeste, caracterizada por uma baixa pressão atmosférica e intensa nebulosidade (Figura 2.10).

Quando a ZCIT está posicionada mais ao Norte, situação comum nos meses de agosto a outubro, os ventos alísios de Sudeste são mais intensos. À medida que a ZCIT migra em direção ao Equador, ocorre uma progressiva redução na intensidade desses ventos, alcançando os valores mínimos anuais durante os meses de março e abril (Figura 2.10).

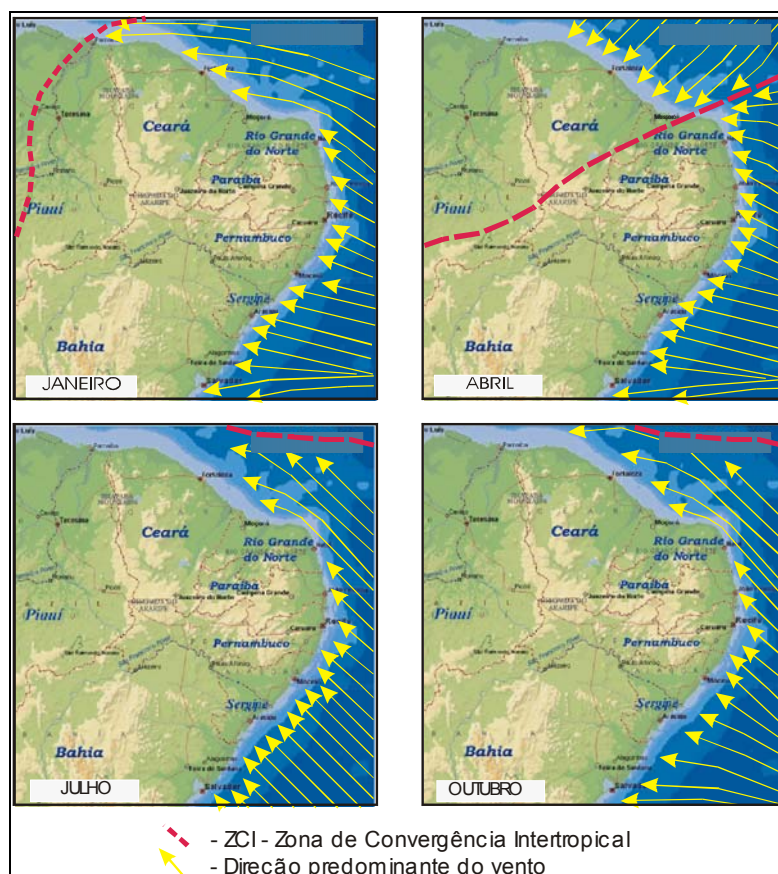


Figura 2.10. Ilustração das diferentes posições ocupadas pela ZCIT durante o ano e padrão dos ventos sobre a costa do Nordeste brasileiro (Martin *et al.*, 1998 *apud* Diniz, 2003).

Modificações importantes no padrão de circulação acima descrito são registradas nos anos de incidência do fenômeno *El Niño* e *La Niña*. O *El Niño* se caracteriza pelo aquecimento anômalo das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial Oriental, dificultando a migração da ZCIT em direção ao Equador e provocando extensos períodos de estiagem para grande parte do Nordeste do Brasil, inclusive para quase todo o Estado do Rio Grande do Norte (Maia, 1998 *apud* Diniz, 2003).

Durante os períodos de *El Niño*, no litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte, ocorre uma redução na incidência dos ventos de NE, enquanto nos períodos de

La Niña (resfriamento das águas na franja equatorial do Oceano Pacífico) ocorrem as maiores precipitações pluviométricas no Nordeste brasileiro e no litoral potiguar anteriormente citado, tem-se um ligeiro acréscimo na incidência dos ventos de NE (Maia, 1998 e Martin *et al*, 1998 *apud* Diniz, 2003).

A velocidade média anual do vento durante o período de 1980 a 1989 (Estação Meteorológica de Macau) é de 6,2 m/s. As menores velocidades médias mensais ocorrem nos meses de março a junho, as quais oscilam entre 4,8 e 5,3 m/s, enquanto as maiores ocorrem nos meses de setembro a novembro, com valores entre 7,3 e 7,7 m/s (Cestaro, 1994) (Figura 2.11).

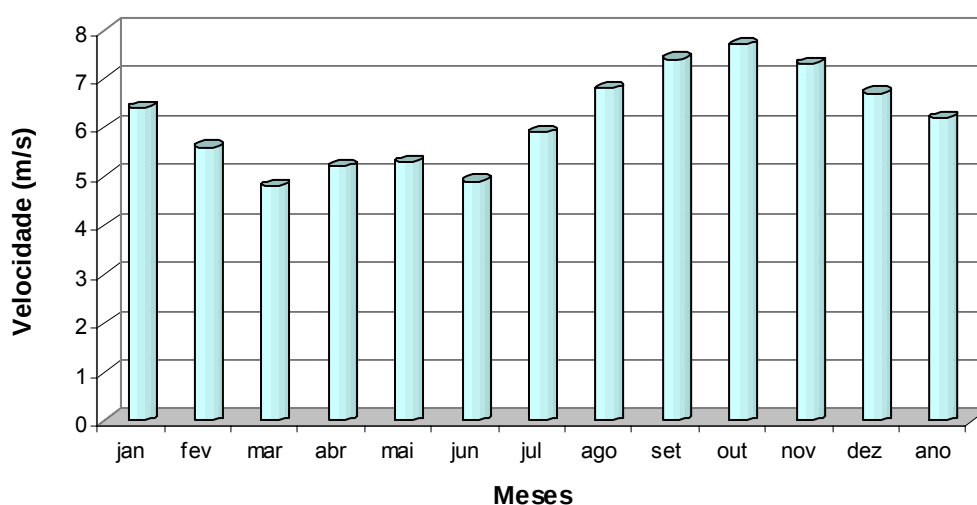


Figura 2.11. Velocidade média mensal e anual do vento na região de Galinhos-RN (Estação Meteorológica de Macau) durante o período de 1980 a 1989 (Adaptado de Cestaro, 1994).

Segundo Cestaro (*op cit.*), durante o período de agosto a abril predominam ventos E, enquanto de maio a julho, os ventos de SE são mais freqüentes. Os ventos NE e N são mais comuns no início e no final do ano.

Medições da direção do vento em Guamaré-RN, realizadas pela Petrobrás-RN, durante janeiro/93 a abril/95, mostram que os ventos são mais freqüentes de SE, E e NE (Costa Neto, 1997) (Figura 2.12).

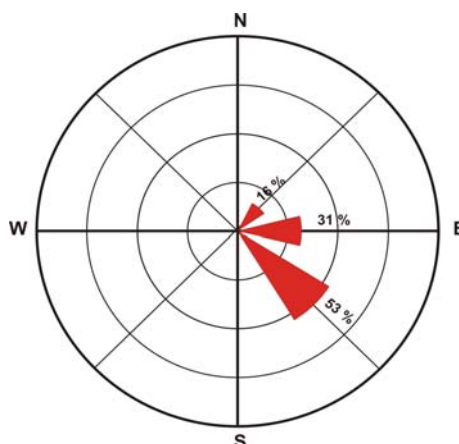


Figura 2.12. Roseta com direção e freqüência do vento em Guamaré-RN medida pela Atividade Marítima do E&P RN/CE - Petrobrás no período de janeiro/93 a abril/95 (Costa Neto, 1997).

2.3.5 Pluviometria

A distribuição espacial das chuvas no município de Galinhos-RN ocorre mais fortemente na zona próxima ao mar, com precipitação total anual média de 902 mm, como observado em Guamaré. Ao Sul do município, as chuvas diminuem com valor total anual médio de 453 mm, no posto de Córregos, município de Pedro Avelino (Cestaro, 1994) (Figura 2.13). A figura 2.14 mostra o mapa de isoetas anuais para o município de Galinhos, caracterizando o incremento das precipitações no sentido Sul-Norte (interior-oceano) da área.

A estação chuvosa é curta e de alta variação, distribuindo-se diferentemente em relação ao interior do município (Sul de Galinhos) e a localidades próximas ao mar, onde as chuvas ocorrem entre o verão e o outono, respectivamente, prolongando-se até o início do inverno.

O coeficiente de variação das chuvas médias anuais nos postos pluviométricos de Guamaré e Córregos, no período de 1963 a 1990, é da ordem de 59 %. Nesses postos, as maiores precipitações anuais foram de 2.238 e 1.094 mm no ano de 1985, respectivamente. Em 1979, no município de Guamaré, a menor precipitação anual foi de 164 mm; e em Córregos (Pedro Avelino), no ano de 1990, a menor precipitação anual foi de 101 mm.

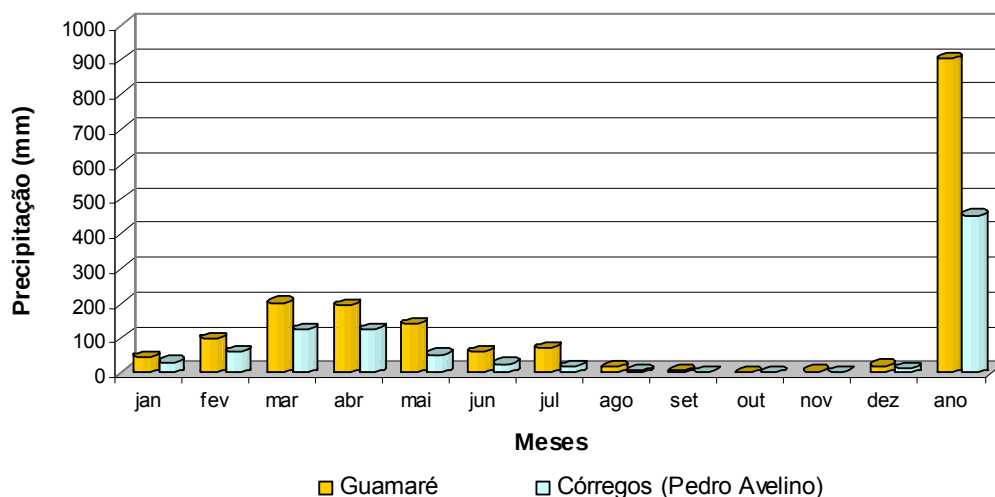


Figura 2.13. Médias mensais e anual das precipitações nos postos pluviométricos de Guararé e Córregos (Pedro Avelino) durante o período de 1963 a 1990 (Adaptado de Cestaro, 1994).

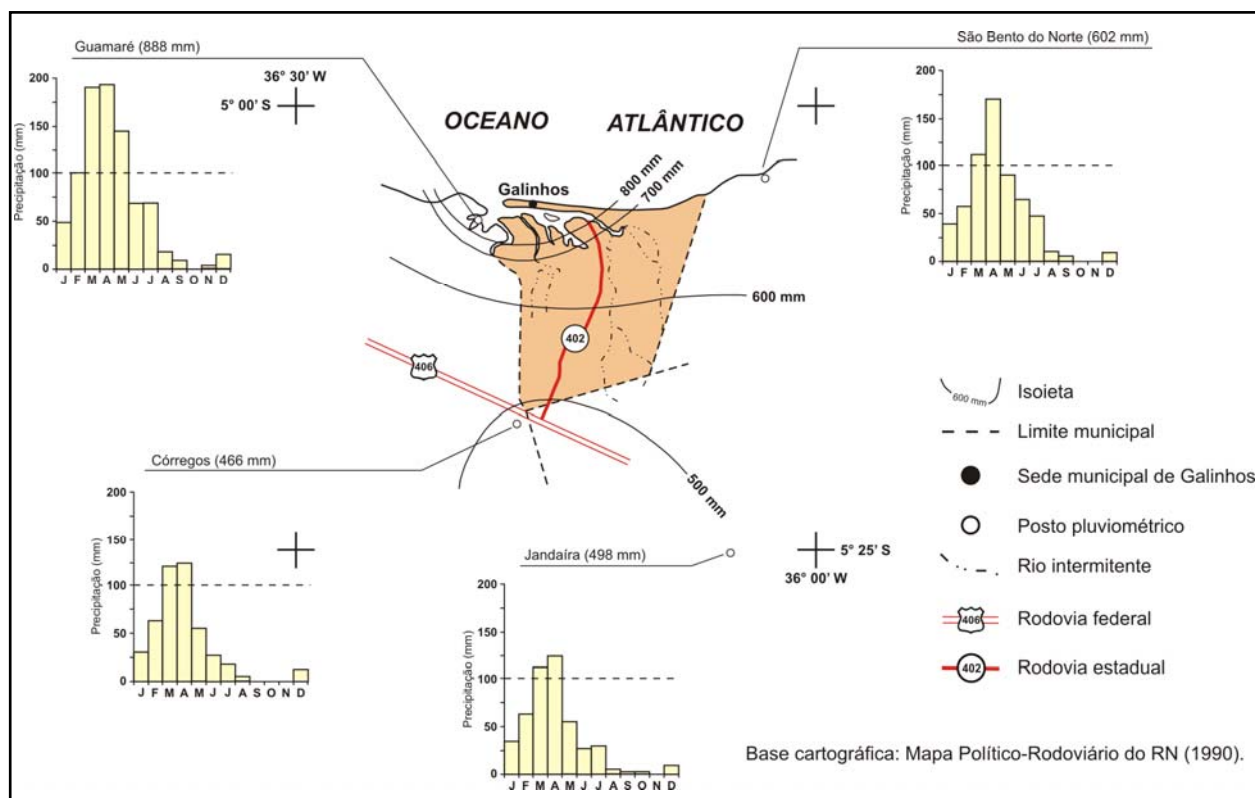


Figura 2.14. Mapa de isoetas anuais para o município de Galinhos-RN e comportamento das precipitações médias mensais e total anual (valor entre parênteses) para os postos pluviométricos de Guararé, Pedro Avelino (Córregos), Jandaíra e São Bento do Norte, para o período de 1963-1985 (Modificado de Cestaro, 1994).

2.3.6 Umidade Relativa

A umidade relativa média anual do município de Galinhos-RN não difere do padrão que ocorre na região, caracterizando-se como sendo aproximadamente constante.

Medições realizadas durante os anos de 1961 a 1990, na Estação Meteorológica de Macau-RN, mostram que a média anual é de 71 %, com a menor média mensal de 66 % (novembro) e a maior de 76 % (abril e maio) (Cestaro, 1994) (Figura 2.15).

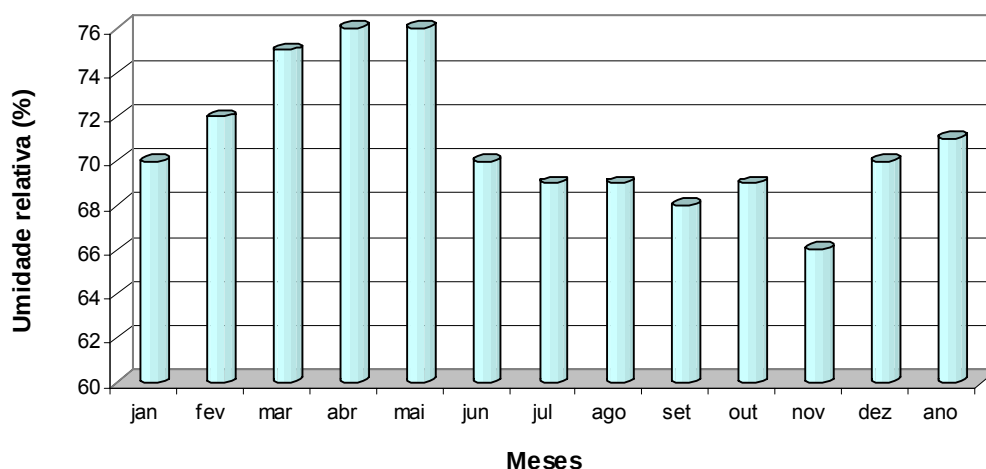


Figura 2.15. Médias mensais da umidade relativa na região de Galinhos-RN (Estação Meteorológica de Macau) durante o período de 1961 a 1990 (adaptado de Cestaro, 1994).

2.4 HIDROGRAFIA

A região de Galinhos está localizada na Faixa Litorânea Norte de Escoamento Difuso, Sub-Bacia 15-4, ocupando uma área de 4.057,6 km², que representa 7,6 % da área do Estado (Figura 2.16), perfazendo um escoamento médio anual estimado de 65,64 x 10⁶ m³ (SERHID, 1995). A região é caracterizada por uma rede hidrográfica incipiente onde ocorrem rios, estuários, canais de marés e lagoas, além de extensas áreas ocupadas por salinas e viveiros para criação de camarão.

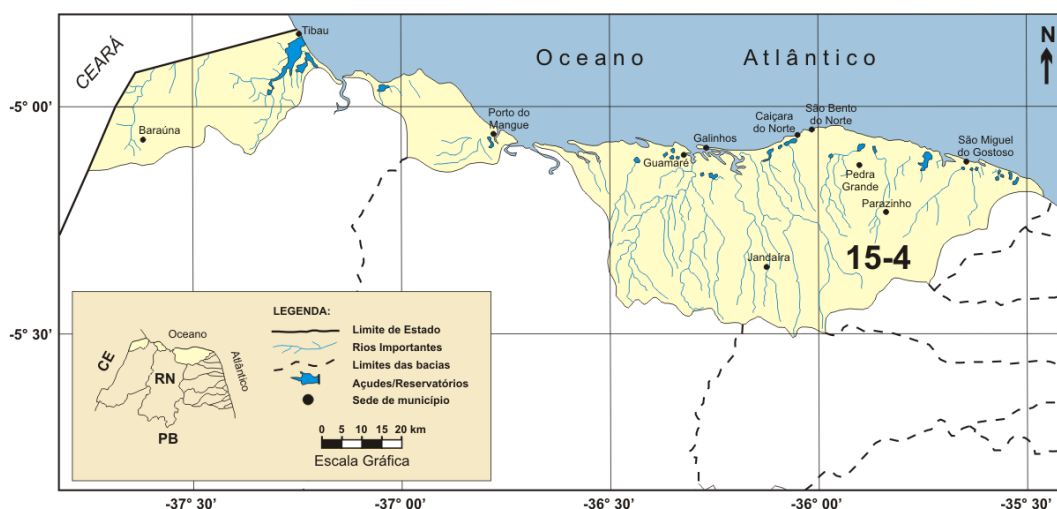


Figura 2.16. Mapa de localização da Bacia Hidrográfica da Faixa Litorânea Norte de Escoamento Difuso 15-4 (Modificado de SERHID, 1995).

Os rios da região são de caráter intermitente, com insignificante fluxo fluvial que ocorre somente durante o período das chuvas e pelo afloramento do lençol freático. A penetração das marés no interior da planície costeira provoca a formação de canais de marés que exercem importante papel na dinâmica local. A cartografia existente, por sua vez, confere a esses canais a nomenclatura de rio.

Assim, todos os rios cartografados na região são, na verdade, canais de marés, tais como os “rios” Aratuá, Miassaba, Porto Capim e Camurupim no município de Guamaré-RN, e os “rios” Pisa Sal, Pratagil, Tomás, Galinhos e Volta do Sertão (3,4 km de extensão), no município de Galinhos-RN (Figura 2.17), os quais formam o complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré, que deságua no Oceano Atlântico em um canal único entre as cidades de Galinhos e Guamaré.

O “rio” Pisa Sal é o curso d’água onde é realizada a captação e o descarte de água utilizada pela fazenda de criação de camarões da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda., possui 8,0 km de extensão e bacia hidrográfica com aproximadamente 36,68 km², dos quais 13,8 km² representam a sua porção sob influência da maré, com os canais do Pisa Salzinho e Labirinto na sua margem esquerda.

Também existe diferença entre a toponímia das drenagens nos principais mapas da região e o conhecimento popular. Na área deste estudo, ocorrem diferenças na toponímia do rio Pisa Sal e do Pratagil em relação à Carta Topográfica da SUDENE (1980) e à toponímia historicamente consagrada pelo conhecimento popular. O rio Pisa Sal aparece cartografado como rio Catanduba. Por sua vez, o rio Pratagil apresenta-se

com o nome de rio Pisa Sal. Neste estudo, utilizaremos, para os cursos d'água da região, a toponímia atualmente em uso pela população local.



Figura 2.17. Vista aérea dos canais de marés cartografados como “rios” e os canais de despesca/drenagem (CD 1 e CD2) da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda. no município de Galinhos-RN (Foto: Bruno Madruga, 2002).

Estudos realizados pela Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte-SERHID (1995), para determinar a disponibilidade superficial a partir de uma série histórica de dados (1936 a 1989) em um posto pluviométrico localizado na foz do rio Camurupim, cuja área da bacia hidrográfica é de 943 km², onde foi aplicado um modelo chuva-deflúvio, mostrou uma vazão média de 0,45 m³/s.

O canal de maré Pratagil encontra-se represado na altura do porto do Pratagil para ampliação da área de evaporadores de uma salina, modificando de sobremaneira a hidrodinâmica local e os ecossistemas ao seu redor. A alteração na hidrodinâmica é evidenciada pela comparação entre as velocidades das correntes de marés de enchente e vazante no referido canal: 0,11 e 0,14 m/s (Santos *et al.*, 2003) respectivamente, e os valores encontrados em outros rios e canais de marés da região.

Na região, ocorrem duas ilhas formadas pela dinâmica estuarina, a saber: ilha da Estiva e ilha das Cobras.

As principais lagoas da região são as lagoas da Catanduba e Salgada que apresentam caráter intermitente e alto grau de salinização. Segundo a SERHID (*op cit*), não existem açudes cadastrados na região.

O complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré é explorado das mais diferentes maneiras, a saber: indústria salineira, transporte e navegação, fazendas de criação de camarão em cativeiro, pesca de linha e rede de espera, captura de caranguejo, coleta de moluscos (ostra, búzios e sururu), pesca submarina de lagosta e peixe por apnéia, retirada de madeira e folhas de mangue, lazer e turismo.

As áreas das planícies de intermarés, planícies de marés e terraços flúvio-estuarinos são utilizadas, principalmente, para ampliação do parque salineiro e para instalação de viveiros de camarões. As planícies de marés também são utilizadas para criação de eqüinos e caprinos, enquanto os terraços flúvio-estuarinos, também são utilizados para agricultura de subsistência (milho, feijão e macaxeira). Além dessas atividades, ocorre também, a exploração de campos de petróleo e gás natural.

2.5 OCEANOGRAFIA

Os processos costeiros são resultantes da interação de agentes dinâmicos, tais como: o vento, as ondas, as correntes, as marés e outros fenômenos, com a zona litorânea. Dessa forma, é importante conhecer as características desses agentes, principalmente a sua magnitude e direção, para melhor entender o comportamento dos processos erosivos e deposicionais atuantes no sistema Pisa Sal, e, conseqüentemente, no complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré.

As marés e as correntes de marés são os principais fenômenos oceanográficos que atuam como agentes dinâmicos em regiões de estuários. As ondas de pequeno comprimento e altura são geradas pelo vento nas porções desabrigadas, principalmente na foz do complexo.

2.5.1 Maré

As marés podem ser classificadas, segundo a periodicidade durante o ciclo lunar, nos seguintes tipos: diurna (período de 24 horas), semidiurna (período de 12 horas) ou maré mista (período variável). As marés, na área de influência do empreendimento, são do tipo semidiurna, com picos de preamar e baixa-mar em intervalos aproximados de 6 horas.

Com base nas variações horárias dos níveis de maré para o porto de Macau/RN (DHN/Marinha do Brasil) que se localiza, aproximadamente, 41 km a Oeste da área de estudo, da Silva *et al* (2006) calcularam segundo Franco (2000), as

constantes harmônicas de maré que apresentaram as seguintes amplitudes: $O_1 = 6,58$ cm, $K_1 = 7,46$ cm, $M_2 = 91,38$ cm e $S_2 = 30,30$ cm. A partir das amplitudes, Silva (*op cit.*) calculou o Número de Forma (N_f) igual a 0,11 que classifica a maré da região como semidiurna.

Medições da amplitude de maré realizadas pela DHN-Marinha do Brasil no porto da Petrobrás, localizado na cidade de Guamaré ($05^\circ 06',3$ S e $036^\circ 19',1$ W), no período de 05/08/1997 a 05/09/1997, utilizando 18 componentes e que consta na sua Tábua de Maré dos portos brasileiros desde 2005, mostram que o nível médio da maré é de 140,94 cm, com o nível médio da maré alta de sizígia de 243,4 cm e o nível médio da maré baixa de sizígia de 28,6 cm. A altura máxima ($H_{\max}$) da maré é de 330,00 cm (Figura 2.18), o que permite enquadrar a região em um regime de mesomaré ($2 \text{ m} < H_{\max} < 4,0 \text{ m}$), segundo Davies (1964). A amplitude máxima da maré varia de + 159,08 a -170,94 cm.

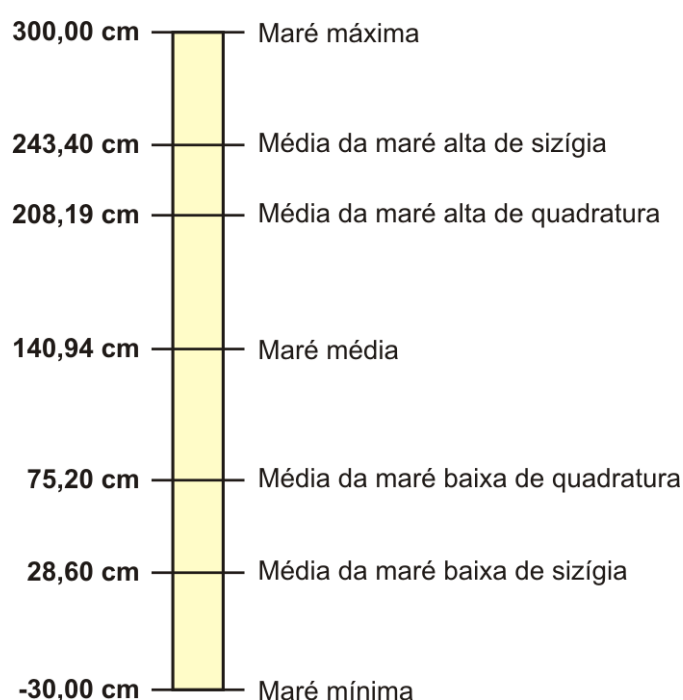


Figura 2.18. Medidas das amplitudes das marés na Estação 30443 – Guamaré, localizada no porto da cidade de Guamaré-RN realizado pela DHN-Marinha do Brasil no período de 05/08/1997 a 05/09/1997 utilizando 18 componentes (Fonte: DHN-Marinha do Brasil).

2.5.2 Corrente de Maré

Estudos de velocidade e direção das correntes de marés e de deriva litorânea foram realizados por Santos *et al* (2003), na região do complexo estuarino lagunar de

Galinhos-Guamaré, utilizando um sensor P 3500 ADCP (Acoustic Doppler Current Profile) (Figura 2.19). Posteriormente, Röber *et al.* (2005) indica que as maiores velocidades (aproximadamente 0,60 m/s) ocorrem no canal de maré próximo ao *spit* de Galinhos. Na região do canal do rio Galinhos, próximo ao distrito de Galos, a corrente de enchente alcança velocidades em torno de 0,50 m/s. Velocidades de 0,20 a 0,40 m/s ocorrem em porções mais profundas e largas dos canais. Paschelke (2000) cita que, no canal de Galinhos, as maiores velocidades ocorrem 2,5 horas antes da preamar e 3,0 horas depois da baixa-mar.

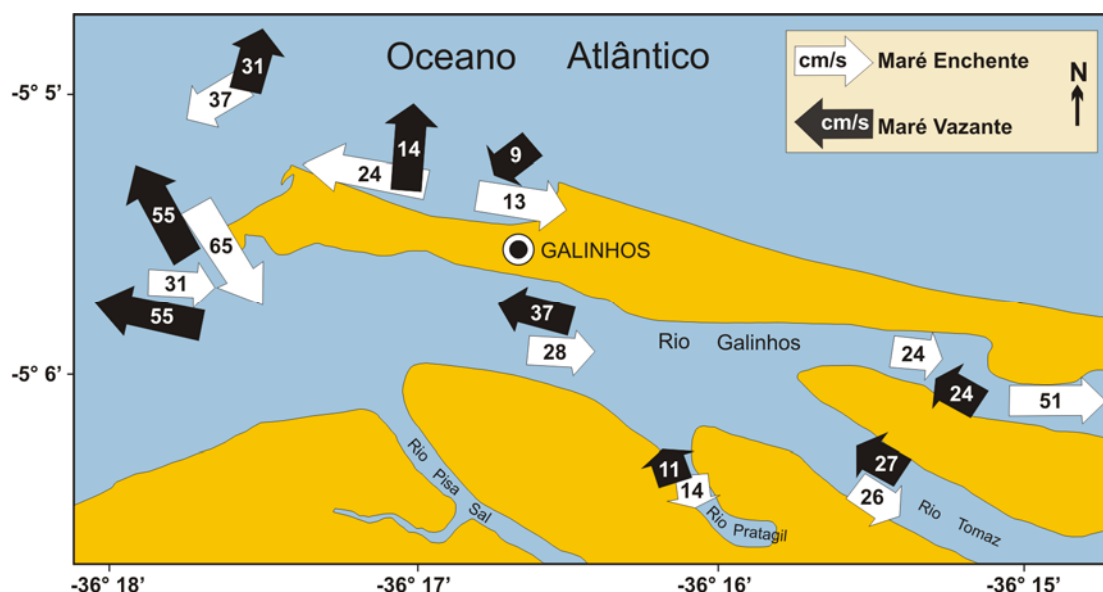


Figura 2.19. Direção (seta) e intensidade (números no interior da seta) das correntes de marés e deriva litorânea (Modificado de Santos *et al.*, 2003).

Medições realizadas por Costa Neto (2004b), no canal Pisa Sal, utilizando flutuadores, mostram que as maiores velocidades médias ocorrem durante a maré de vazante com valores em torno de 0,38 m/s e que a velocidade média máxima é da ordem de 0,53 m/s. Durante as marés de enchente, as velocidades médias são da ordem de 0,20 m/s. As velocidades máximas ocorrem, aproximadamente, 1 hora após a preamar e perduram por cerca de 1,5 a 2,0 horas.

Estudos desenvolvidos pela ENCAL (*apud* Ecoplan, 2000), entre julho e agosto de 1981, mostraram velocidades das correntes de marés na região de Guamaré variando entre 0,21 e 0,50 m/s.

Estudos hidrodinâmicos recentes realizados por Chaves e Vital (2001), no trecho do litoral compreendido entre a ponta do Tubarão e o canal de maré Corta

Cachorro (Macau-RN), no período de novembro de 2000 a junho de 2001, mostram que a velocidade da corrente de deriva litorânea variou entre 1,103 m/s e 0,171 m/s, enquanto a variação média do ângulo de incidência das ondas foi de 305° Az.

Costa Neto (1997) estudando a incidência das ondas na linha de costa do município de Macau-RN, encontrou o ângulo médio de 24° e a altura média das ondas de 0,75 m. A partir da equação de Longuet-Higgins (1970 *apud* Costa Neto, 1997), determinou a velocidade da corrente de deriva litorânea na região da ponta do Tubarão (Macau-RN) na ordem de 1,63 m/s na direção W.

2.5.3 Ondas

Segundo Lima *et al.* (2000), as ondas na região de Galinhos-RN atingem a costa num ângulo entre 45 e 50°, o que gera um forte mecanismo de deriva litorânea responsável pelo transporte das areias do litoral de Leste para Oeste.

Por sua vez, estudos realizados por Chaves e Vital (2001), ao longo do trecho de praia entre a ponta do Tubarão e o canal de maré Corta Cachorro (Macau-RN), no período de novembro de 2000 e junho de 2001, revelam que a altura das ondas varia de 0,722 a 0,125 m, enquanto o período varia de 33,36 a 80,07 segundos.

Dados de observações visuais da altura média das ondas na região de Guamaré-RN (Petrobrás, Atividade Marítima do E&P RN/CE *apud* Costa Neto, 1997) apresentam valores que variam de 0,97 a 1,35 m, com uma média de 1,14 m para o período observado (Figura 2.20).

Estudos realizados pelo INPH (*apud* Ecoplan, 2000) no período de fevereiro de 1980 a março de 1981, na região de Guamaré-RN, mostram que o padrão de ondas predominantes atinge altura máxima (Hmax) de 1,69 m e direção associada de 52° com períodos de 4 a 5 s.

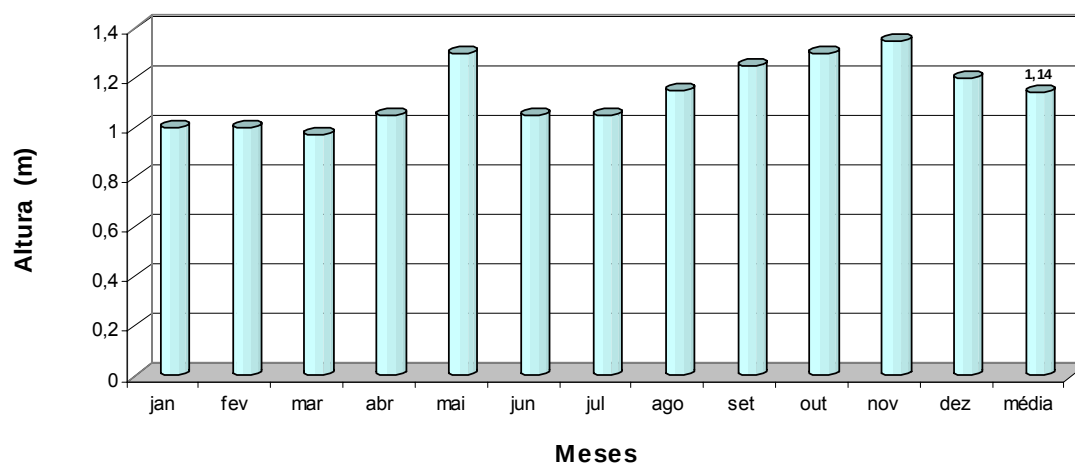


Figura 2.20. Altura média mensal das ondas medidas na região de Guamaré durante o período de janeiro/1993 a abril/95 (Petrobrás, Atividade Marítima do E&P RN/CE *apud* Costa Neto, 1997), bem como a média para o período estudado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os diferentes materiais utilizados neste trabalho, bem como as respectivas metodologias adotadas, as quais foram descritas de forma integrada e sucinta, estão relacionados às seguintes etapas: pesquisa bibliográfica e cartográfica; trabalhos de campo, procedimentos de laboratório e trabalhos de gabinete, que ao final foram integrados de forma a permitir a sua melhor utilização, permeando os diversos temas. A figura 3.1 mostra o fluxograma das etapas supra citadas.

A descrição dos diferentes materiais utilizados e o detalhamento das referidas metodologias apresentado nos seus capítulos respectivos, tem como finalidade permitir a visualização contínua de cada capítulo abordado e as suas interações.

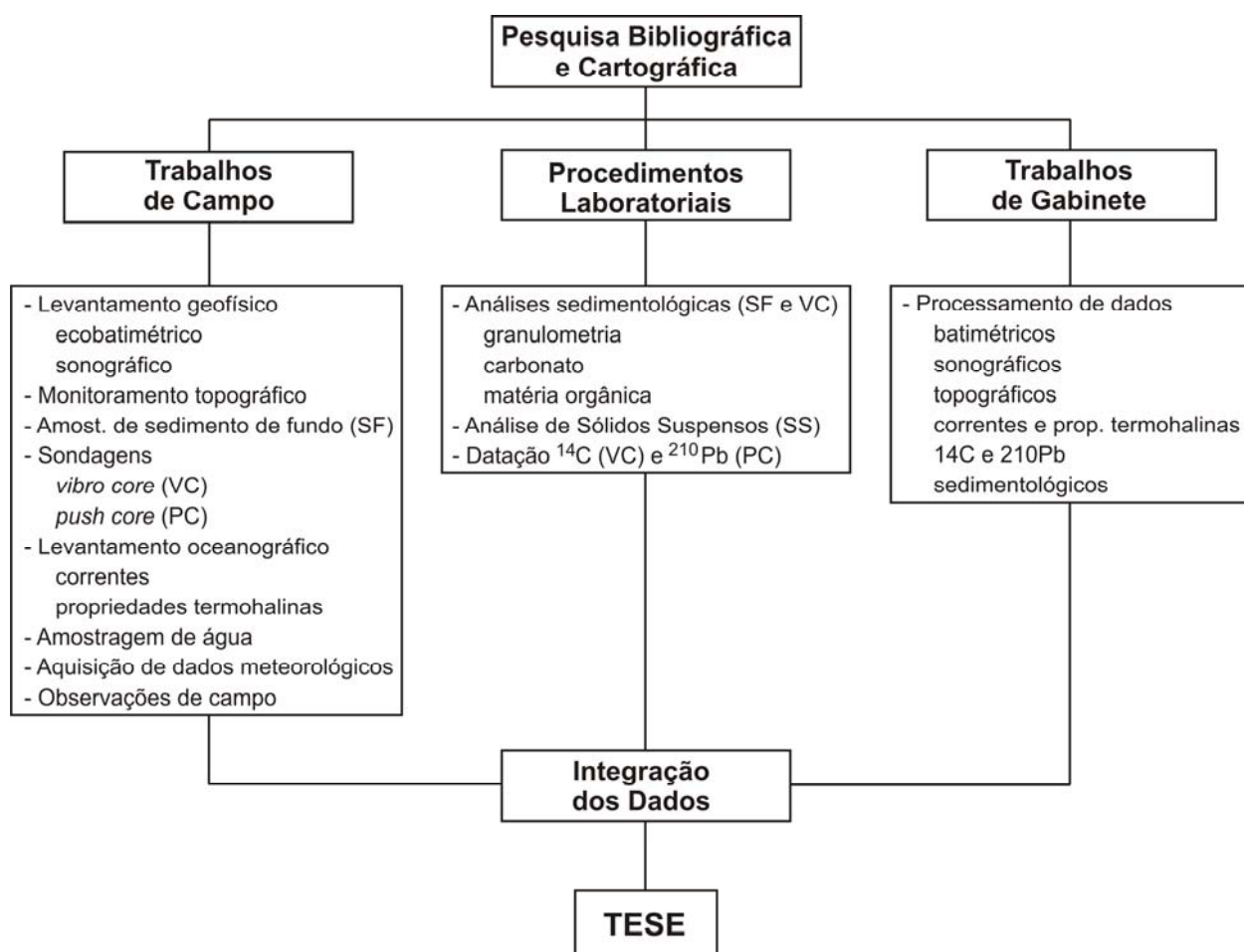


Figura 3.1. Fluxograma das atividades desenvolvidas neste trabalho.

3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E CARTOGRÁFICA

O levantamento bibliográfico foi realizado, tomando-se como referência os trabalhos técnico-científicos publicados em periódicos, revistas, anais de congressos internacionais e nacionais, relacionados à área da geologia, geomorfologia, geofísica, oceanografia, aquícultura e meteorologia em ambientes estuarinos lagunares de mesomaré que ocorrem ao redor da Terra, além de, especificamente, os relacionados a região do complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré, localizado no litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, objeto deste estudo.

A pesquisa cartográfica levou à obtenção de mapas geológicos regionais e de produtos de sensoriamento remoto, na forma de imagens de satélites Ikonos (2003), pertencentes ao Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente-IDEMA, órgão ambiental do Estado utilizada para elaboração da base cartográfica.

3.2 TRABALHOS DE CAMPO

Foram realizados levantamentos ecobatimétricos e sonográficos ao longo do sistema Pisa Sal que engloba os canais Pisa Sal e Volta do Sertão, como também na porção do rio Galinhos em frente à desembocadura do Pisa Sal

O levantamento ecobatimétrico foi executado nos dias 31/07/2004, 27 e 28/08/2004 e 18/09/2004, totalizando aproximadamente 41 km de perfis, utilizando um ecobatímetro da marca FURUNO, modelo 1650 F que possui o sistema DGPS (Diferencial Global Positions System) acoplado. Este equipamento é de propriedade do Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte - CEFET/RN. Simultaneamente ao levantamento batimétrico, foram coletados dados da variação da maré, a partir da régua instalada pela UFRN no porto da PETROBRAS na cidade de Guamaré-RN (5° 6,5' S e 36° 19' W).

O levantamento com sonar de varredura lateral (*side scan sonar*) foi realizado nos seguintes dias: 03/07/2004, 17 e 18/09/2004, ao longo dos canais dos rios Pisa Sal e do rio Volta do Sertão. O equipamento utilizado foi um sonar de varredura lateral monocal da marca *Odom Hydrographic Systems*, modelo *HYDROTRAC* de propriedade do GGEMMA/PPGG /UFRN. Para o posicionamento dos perfis, foi utilizado o sistema DGPS.

Foi executado o monitoramento topográfico das margens dos canais do Pisa Sal, Volta do Sertão e Pisa Salzinho (6 perfis), além de 7 perfis nas margens dos canais de pesca (CDs) da empresa de criação de camarão em cativeiro - Camarus Aquacultura do Nordeste que apresentam evidência de processos erosivos. Os CDs, serão denominados, a partir de agora, de CD1 e CD2. O monitoramento foi realizado durante o período de 06/2004 a 08/2006 (27 meses), utilizando-se Medidor Eletrônico de Distância (MED), tipo Estação Total modelo Elta 50 (Trimble Zeiss).

Amostragem de sedimentos de fundo foi realizada ao longo do canal Pisa Sal e no centro e margens dos CDs, utilizando-se draga Gibbs (Pisa Sal) e amostrador de mão de PVC (CDs). O posicionamento das amostras no rio Pisa Sal foi realizado pelo sistema DGPS, enquanto, nos CDs, foram posicionadas com estação total durante o monitoramento.

Sondagens *vibro core* (VC) e *push core* (PC) foram coletadas para datação e quantificação da taxa de sedimentação (TS) em bancos lamosos localizados nas margens direita e esquerda do canal Pisa Sal e na margem esquerda do canal Volta do Sertão.

Os dados oceanográficos físicos foram coletados em duas campanhas distintas, a saber:

- Maré de quadratura e sizígia durante o inverno (08 a 09/06/2007 e 15 e 16/06/2007) e verão (17 a 18/12/2007 e 26 a 27/12/2007) em três estações fixas utilizando-se uma sonda da marca Valeport, modelo 108 Mk III-308 *Current Meters*, que comporta um correntômetro e um CTD conjugados. Neste levantamento, foram coletados os seguintes dados: velocidade e direção das correntes, temperatura, condutividade, pressão, salinidade, densidade e velocidade do som na água.

- Maré de sizígia durante o inverno (14 a 17/07/2007) em uma estação fixa na margem direita do canal Pisa Sal e uma estação fixa no interior de cada CD de onde foram coletados dados de velocidade e direção das correntes e variação da maré, utilizando-se um medidor de corrente S4 da marca InterOcean System.

Amostras de água também foram coletadas com garrafa de Niskin no canal Pisa sal e Volta do Sertão durante a campanha oceanográfica realizada no período de 19 a 21/11/2004. Também foram coletadas amostras de água nos CDs e nos canais em frente aos perfis do monitoramento topográfico.

Por último, dados meteorológicos foram coletados a partir de uma estação meteorológica (marca Davis, modelo *Weather Monitor II*) instalada no dia 23/05/2004

na sede da fazenda de camarão da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda. e desativada no dia 20/08/2006, totalizando 27 meses de operação, durante os quais foram registrados numa periodicidade horária, os seguintes parâmetros: vento (velocidade e direção), temperatura (mínima, média e máxima), sensação térmica, pluviosidade, umidade relativa, pressão atmosférica e ponto de condensação da água.

3.3 PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

As amostras de sedimentos de fundo foram analisadas quanto à granulometria a partir de um granulômetro a laser no Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha-GEMMA/PPGG/UFRN. O teor de carbonato e de matéria orgânica foi quantificado no Laboratório de Recursos Naturais do Museu Câmara Cascudo/UFRN, enquanto o conteúdo de sólidos suspensos (SS) em amostras de água foram analisados no Laboratório de Saneamento Ambiental do Departamento de Recursos Naturais do CEFET/RN.

A descrição sedimentológica dos testemunhos *vibro core* (VC) foi realizada no Laboratório de Sedimentologia da UFRN; a separação granulométrica, a classificação textural, a análise de carbonato, a análise de matéria orgânica e a datação por ^{14}C foram realizadas no Laboratório de Leibniz-Kiel, Universidade de Kiel-Alemanha, como parte do convênio UFRN-Universidade de Kiel. Para determinação da taxa de sedimentação as amostras dos testemunhos *push core* (PC) foram analisadas para ^{210}Pb no International Atomic Energy Agency- IAEA em Mônaco.

3.4 TRABALHOS DE GABINETE

Dos dados de profundidade, foram reduzidas a maré, a partir da determinação das suas respectivas variações de altura na régua instalada no porto de Guamaré/RN (Petrobrás) pela DG/PPGG/UFRN. Em seguida, foram gerados *grids*, e a partir destes, gerados mapas de isolinhas e de contornos da superfície. Para a gridagem dos dados, foram testados diversos interpoladores, bem como foi definido o espaçamento ótimo das linhas para gridagem. Dentre os métodos de interpolação, a *krigagem* apresentou os melhores resultados, uma vez que os dados apresentam boa distribuição espacial.

Os registros de sonar de varredura lateral, em formato analógico, foram escaneados, editados e interpretados.

Os dados do monitoramento topográfico foram tabulados e calculado os volumes de material erodido e/ou depositado.

As amostras de sedimentos de fundo foram processadas estatisticamente no *software* SAG (Sistema de Análise Granulométrica) desenvolvido pelo LAGEMAR/UFF e classificados segundo Vital *et. al.* (2005).

Para o processamento e análise dos dados correntográficos e das propriedades termohalinas, foi utilizado o programa ESTUÁRIO, adaptado por Bérghamo (2001) ao programa DINEST, desenvolvido por Marco A. Correa.

4 METEOROLOGIA DA REGIÃO ADJACENTE AO SISTEMA PISA SAL

Este capítulo apresenta a caracterização meteorológica (vento, temperatura, precipitação e umidade relativa) da área, durante o desenvolvimento desta pesquisa, a partir dos dados de uma estação meteorológica instalada na fazenda de criação de camarão da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.

Estes dados também foram utilizados para subsidiar as interpretações sobre erosão e transporte de sedimentos, uma vez que as estações meteorológicas existentes situam-se afastadas da área em questão (Macau, São Bento do Norte, Pedro Avelino e Guamaré), como apresentadas no Capítulo 2, e, muitas vezes, não representam a realidade.

4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS METEOROLÓGICOS

Foi instalada uma estação meteorológica Davis, modelo *Weather Monitor II* para a coleta de dados climatológicos durante o período deste trabalho: 23 maio de 2004 a 20 de agosto de 2006, totalizando 27 meses. A estação meteorológica foi localizada nas coordenadas UTM: 804.035,058 m E e 9.430.498,883 m N (Datum WGS 84, Zona 24 M), distando 6,4 km e 8,0 km das cidades de Galinhos e Guamaré, respectivamente (Figura 4.1). A estação foi instalada no topo da caixa d'água, a uma altura de 11,5 m (Figura 4.2), livre de obstáculos,

Foram registrados os seguintes parâmetros meteorológicos: vento (velocidade e direção), temperatura (mínima, média e máxima), precipitação, umidade relativa. Esses dados foram enviados *on line* numa frequência horária para o *Weather Monitor II* (estação de recepção) que estava conectado a um computador via *WeatherLink data logger* e foram descarregados, diariamente, via *WeatherLink Software for Window*.

A série de 27 meses de coleta de dados não é representativa para uma avaliação completa do sistema climático do município de Galinhos. Entretanto, nesse estudo, foram utilizados apenas os parâmetros que pudessem auxiliar nas interpretações dos diversos temas abordados, tais como: influência do vento no transporte eólico e no transporte de sedimentos no rio Pisa Sal, influência das chuvas nos processos erosivos, influência da temperatura no aquecimento da coluna d'água, etc. Dados pretéritos também foram utilizados no auxílio do entendimento do comportamento dos parâmetros meteorológicos na região estudada.

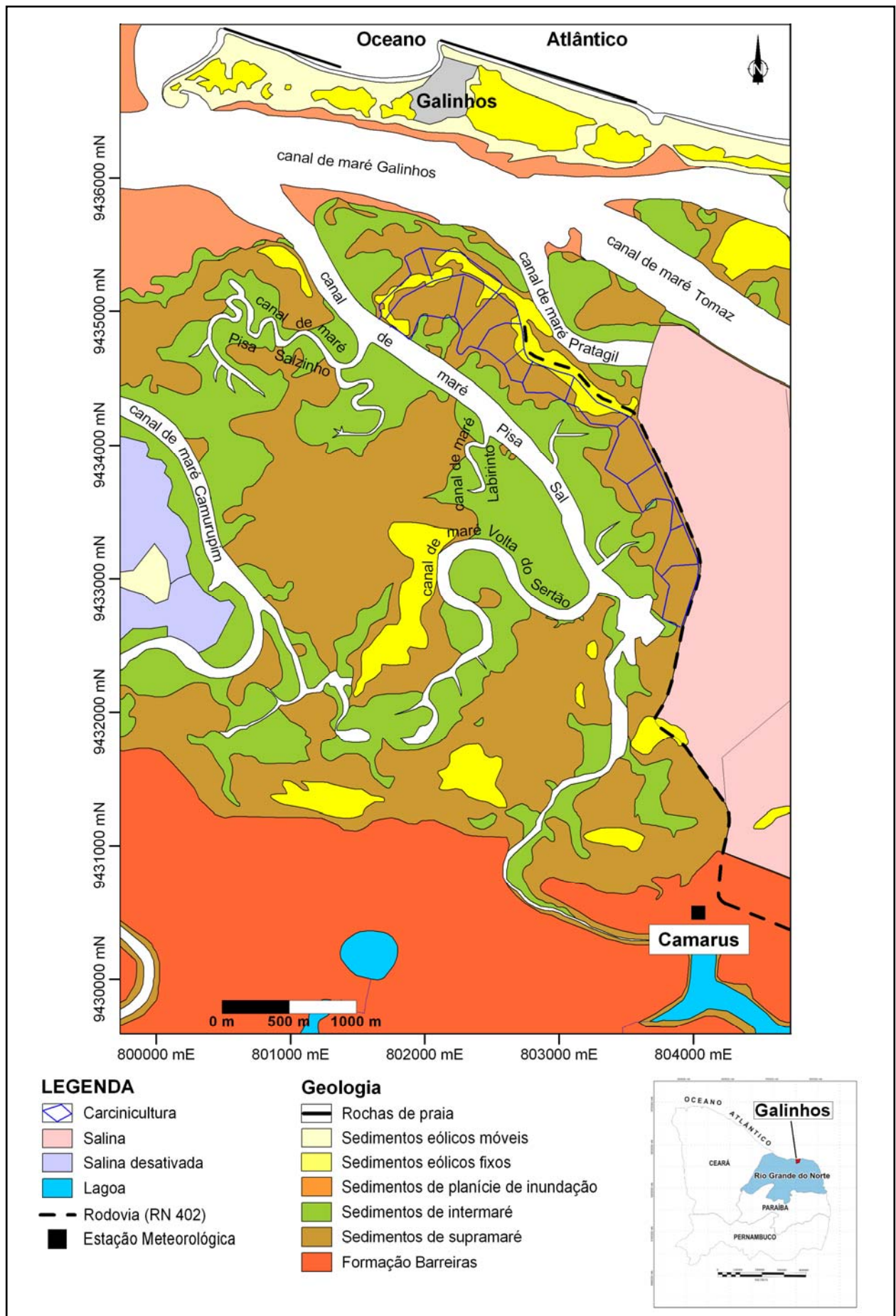


Figura 4.1. Mapa de localização da estação meteorológica instalada na sede administrativa da empresa Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda. (Modificado de Camarus, 2003).



Figura 4.2. Estação meteorológica instalada no topo da caixa d'água da sede administrativa da fazenda de criação de camarões da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda., mostrando o anemômetro (A e B), pluviômetro (C) e o sensor de umidade e temperatura (D).

4.2 PARÂMETROS METEOROLÓGICOS

4.2.1 Vento

A velocidade dos ventos na região de Galinhos mostra dois núcleos bem definidos: um que se estende de julho a março com velocidades mais elevadas e outro mais restrito e com velocidades baixas entre abril e junho. As velocidades médias mensais variam entre 10,64 e 18,44 km/h. No período de março a julho, os ventos são mais fracos com velocidades variando de 10,64 km/h (abril) a 13,54 km/h (julho), enquanto, no período de agosto a fevereiro, apresentam maiores velocidades, variando na ordem de 17,00 (fevereiro) a 18,44 km/h (outubro). As velocidades mínimas e máximas médias mensais variam de 0,0 a 3,2 km/h e 27,4 a 46,7 km/h, respectivamente (Figura 4.3). Velocidades maiores que 30 km/h ocorrem entre o período das 12 as 17 h. As velocidades máximas absolutas variam entre 45,1 e 75,6 km/h. Os maiores valores foram observados nos meses de agosto/2004 (69,2 km/h), outubro/2004 (72,4 km/h), novembro/2004 (69,2 km/h), dezembro/2004 (64,4 km/h), março/2005 (70,8 km/h), outubro/2005 (75,6 km/h), dezembro/2005 (54,7 km/h) e julho/2006 (64,4 km/h) (Figura 4.4).

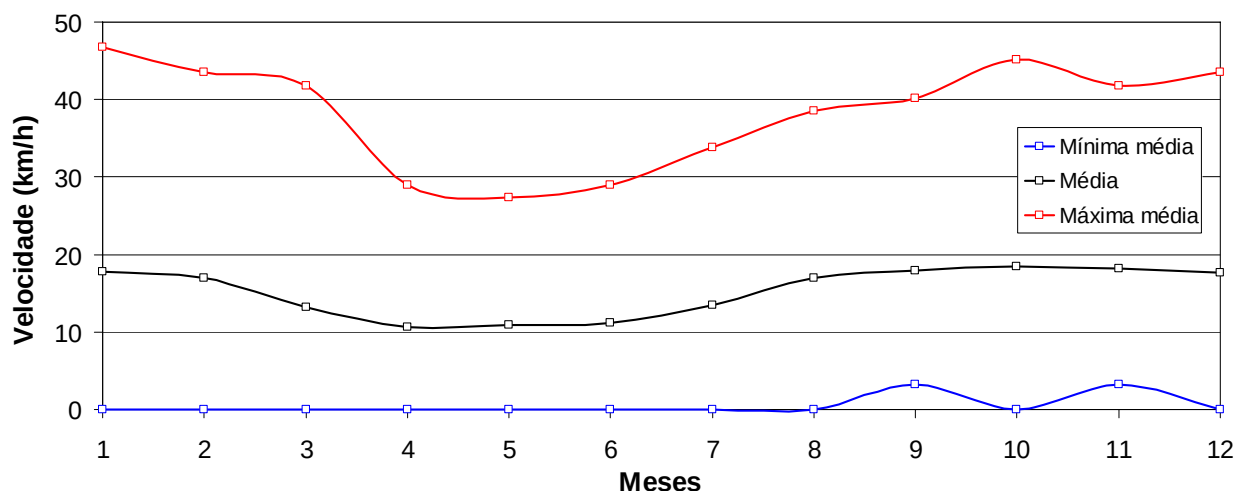


Figura 4.3. Velocidades mínimas e máximas médias e médias mensais do vento no município de Galinhos-RN no período de junho de 2004 a julho de 2006 (Estação meteorológica instalada na sede administrativa da Camarus Aquicultura do Nordeste Ltda.).

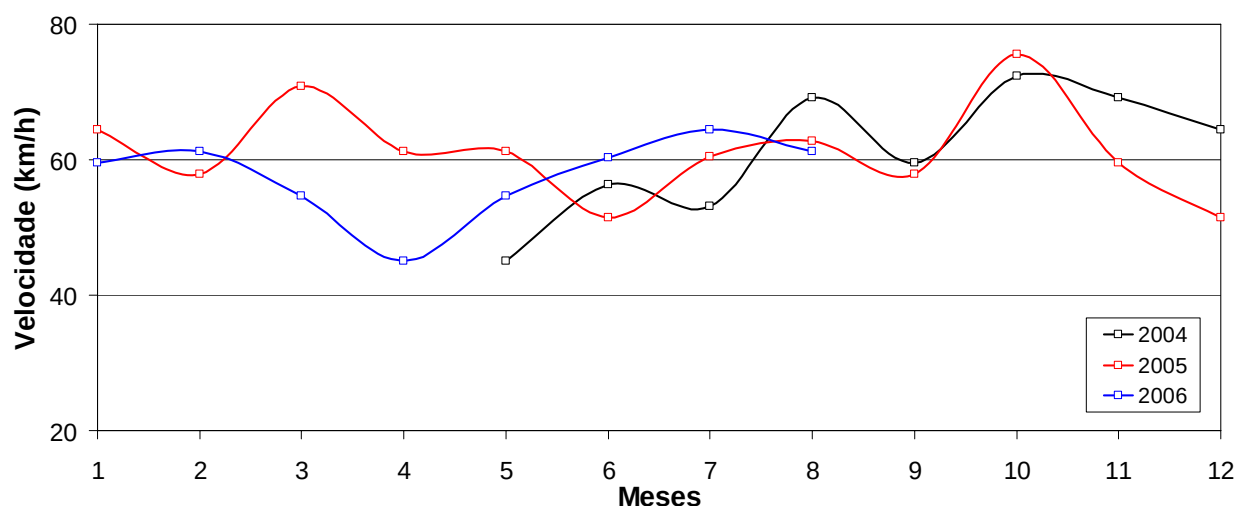


Figura 4.4. Velocidades máximas do vento no município de Galinhos-RN no período de junho de 2004 a julho de 2006 (Estação meteorológica instalada na sede administrativa da Camarus Aquicultura do Nordeste Ltda.).

Eventos dessa magnitude são isolados, porém responsáveis pela geração de grande número de “redemoinhos” (ventos em espiral, formados pela convecção do ar, em dias quentes, sem ventos e de muito sol, também conhecidos como, pés-de-vento) que chegam a provocar destruição nas construções locais. Como exemplo, cita-se os fortes ventos que ocorreram no dia 9 de dezembro de 2005 entre as 10 e 12h atingindo velocidades máximas de 54,7 km/h, destelhando parte do estacionamento da sede administrativa da Camarus e deslocando as telhas por mais de 30 metros (Figura 4.5).



Figura 4.5. Estacionamento da sede administrativa da Camarus Aquacultura do Nordeste destelhada por ventos fortes no dia 9 de dezembro de 2005 entre as 10 e 12 h.

A direção predominante dos ventos no município de Galinhos-RN, ao longo do ano é no quadrante SE, ocorrendo variações para o quadrante NE e na direção E (Figura 4.6).

Ventos do quadrante SE foram registrados ao longo de todo ano. Velocidades inferiores a 10 km/h, com mais de 10 % das observações, ocorreram entre os meses de janeiro a julho e entre outubro e dezembro. Velocidades entre 10 e 30 km/h também ocorreram durante todo ano; alguns meses apresentaram entre 30 a 45 % das observações, como, por exemplo, nos meses de julho a novembro. Velocidades superiores a 30 km/h, nesse quadrante, só ocorreram no mês de outubro em menos de 1 % das observações (Figura 4.6).

Os ventos do quadrante NE começaram a aparecer em mais de 5 % das observações a partir do mês de outubro e perduraram até o mês abril. Nesses meses, as velocidades nas direções NE e ENE apresentaram valores entre 20 e 30 km/h e maiores que 30 km/h, as quais representam entre 5 e 15 % das observações. O mês de fevereiro é o que apresentou os maiores percentuais (aproximadamente 15 %) das velocidades anteriormente citadas. No mês de dezembro, os ventos NE apresentaram velocidades superiores a 30 km/h em mais de 10 % das observações (Figura 4.6).

Ventos E ocorrem em pequenas proporções e associados aos ventos do quadrante NE. Ocorreram a partir do mês de outubro e se estenderam até o mês de maio em percentuais que variam em torno de 5 e 11 %. As velocidades foram sempre inferiores a 30 km/h (Figura 4.6).

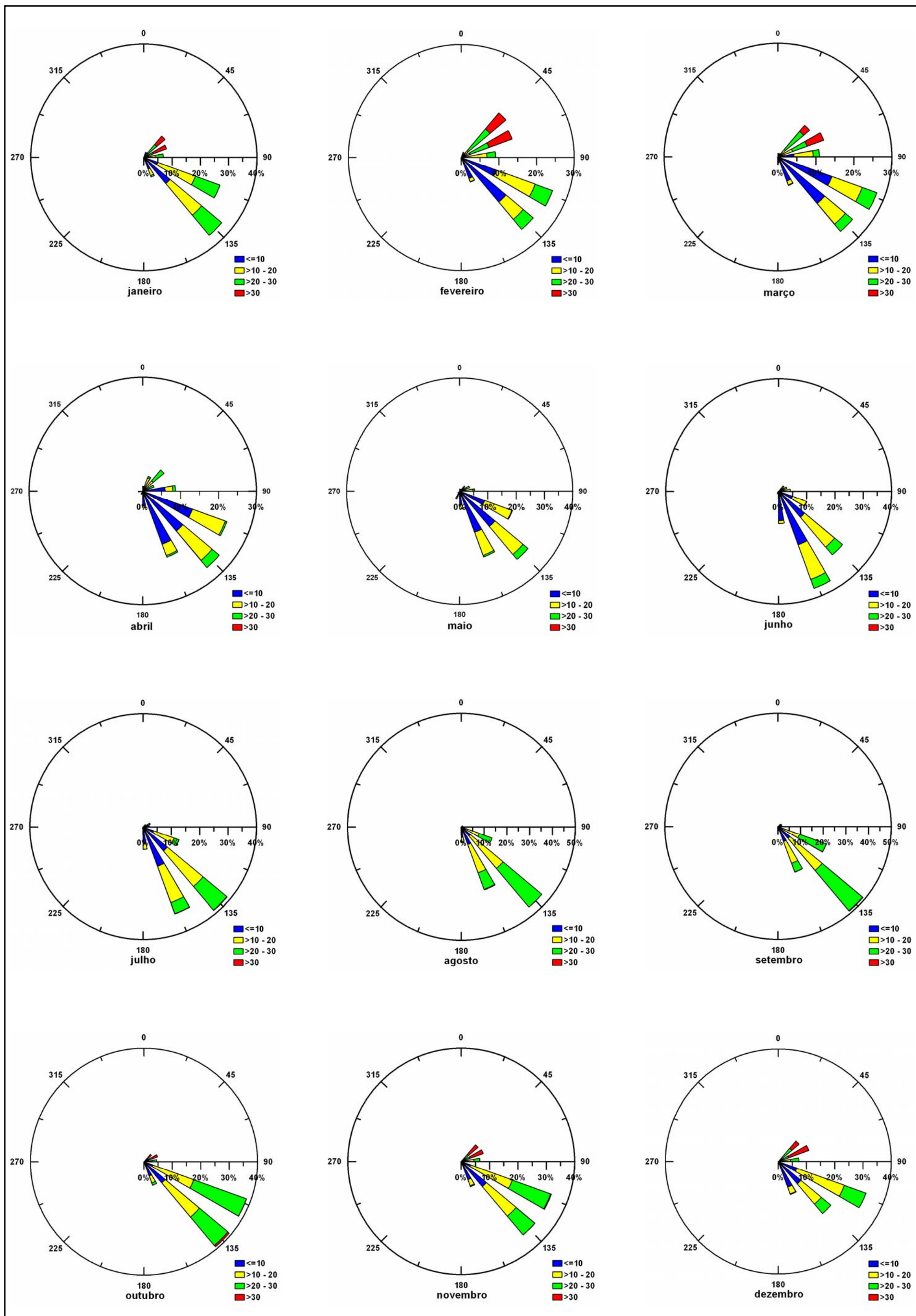


Figura 4.6. Direções (grau) e velocidades médias mensais (km/h) dos ventos no município de Galinhos no período de junho de 2004 a julho de 2006 (Estação meteorológica instalada na sede administrativa da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.).

4.2.2 Temperatura do ar

A região de Galinhos-RN, ao longo do ano, apresenta temperaturas mínimas médias de 26,38 °C (junho) e temperaturas máximas médias de 30,58 °C (janeiro) (Figura 4.7), com temperatura média para o período deste estudo de 28,44 °C. As variações entre as temperaturas máximas e mínimas médias mostraram amplitudes entre 1,13 a 1,33 °C. O ano de 2004 mostrou a maior variação, enquanto em 2005 ocorreu a menor variação (Tabela 4.1).

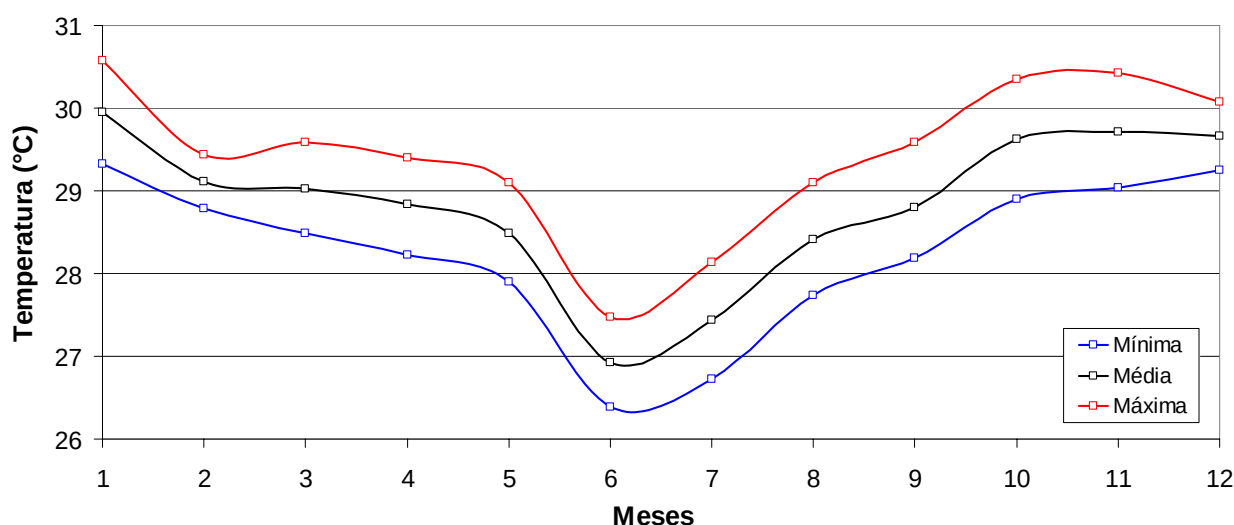


Figura 4.7. Temperaturas mínima, média e máxima no município de Galinhos-RN no período de junho de 2004 a julho de 2006 (Estação meteorológica instalada na sede administrativa da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.).

Tabela 4.1. Temperaturas mínimas e máximas médias, médias e a amplitude entre as máximas e mínimas médias anuais no município de Galinhos (Estação meteorológica instalada na sede administrativa da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda. no período de maio de 2004 a agosto de 2006).

Ano	Mínima	Média	Máxima	Max – Min
	(°C)			
2004	27,89	28,54	29,22	1,33
2005	28,40	28,96	29,53	1,13
2006	28,05	28,66	29,27	1,22

As médias das máximas temperaturas mostraram valores superiores a 30 °C nos meses de janeiro (30,58 °C), outubro (30,35 °C), novembro (30,43 °C) e dezembro (30,08 °C) (Figura 4.7). As maiores temperaturas ocorreram em dois períodos do ano,

que totalizam seis meses, a saber: janeiro a março e outubro a dezembro. As menores temperaturas ocorreram no período de abril a setembro (Figura 4.7).

4.2.3 Precipitação

A precipitação média no município de Galinhos durante 26 meses de coleta de dados foi de 248,7 mm, totalizando para o período 746,0 mm (Figura 4.8), considerando que, nos anos de 2004 e 2006, os dados foram coletados durante apenas sete meses, perfazendo 58,3 % do ano.

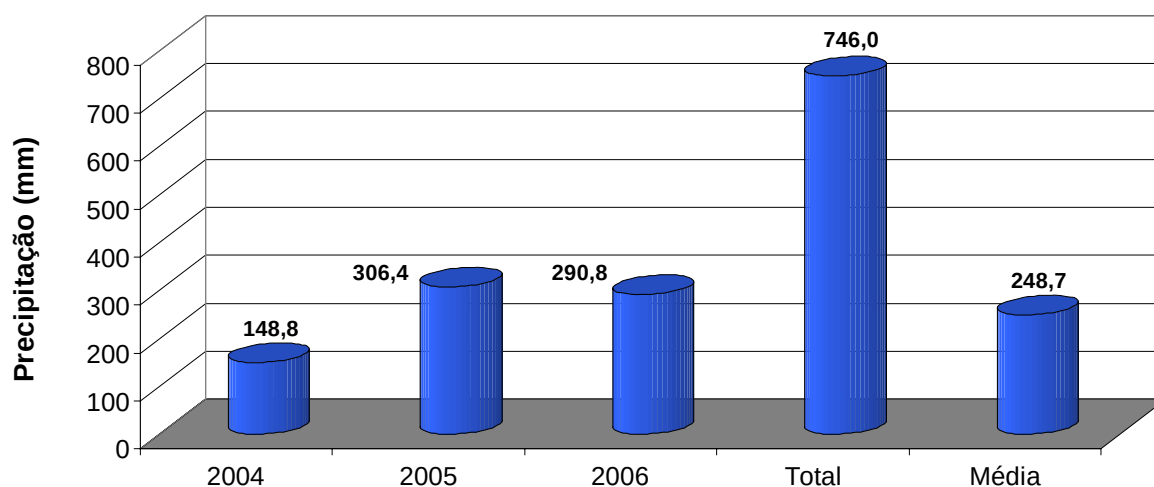


Figura 4.8. Precipitação anual, total e média do município de Galinhos-RN no período de junho de 2004 a julho de 2006 (Estação meteorológica instalada na sede administrativa da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.).

O período em que mais choveu, com precipitações superiores a 100 mm, foi de março a junho. No resto do ano, as chuvas atingiram valores inferiores a 50 mm. Nos meses de janeiro, agosto e outubro, o volume de chuva variou entre 0,4 e 3,0 mm, enquanto que, nos meses de novembro e dezembro, o volume registrado foi de 0 % (Figura 4.9).

Durante o estudo foram observados três períodos em que a precipitação mensal excedeu 60 mm, a saber: junho de 2004, maio a junho de 2005 e março a junho de 2006. O mês de maior precipitação ocorreu em maio de 2005 que atingiu 107,4 mm (Figura 4.10).

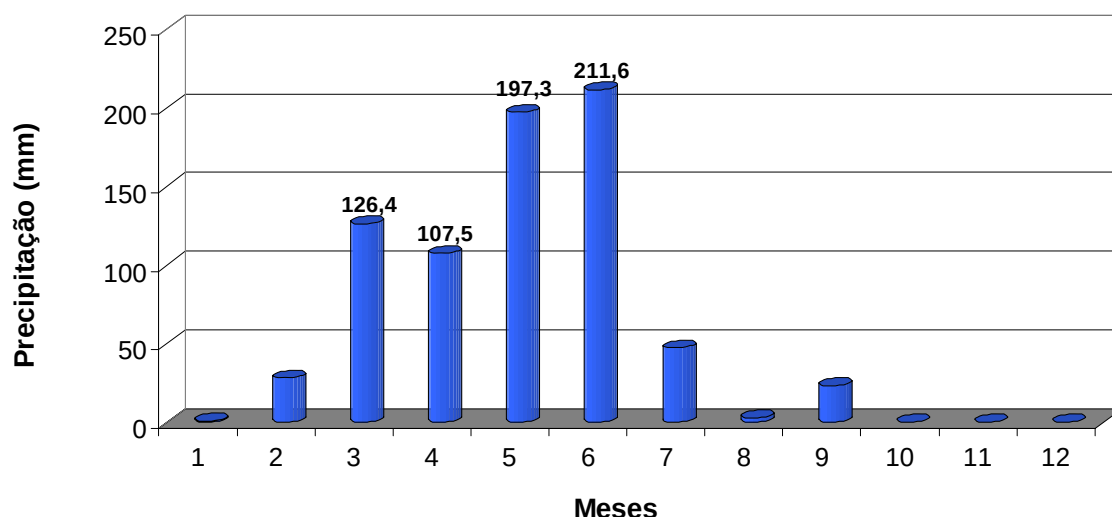


Figura 4.9. Precipitação mensal acumulada no município de Galinhos-RN no período de junho de 2004 a julho de 2006 (Estação meteorológica instalada na sede administrativa da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.).

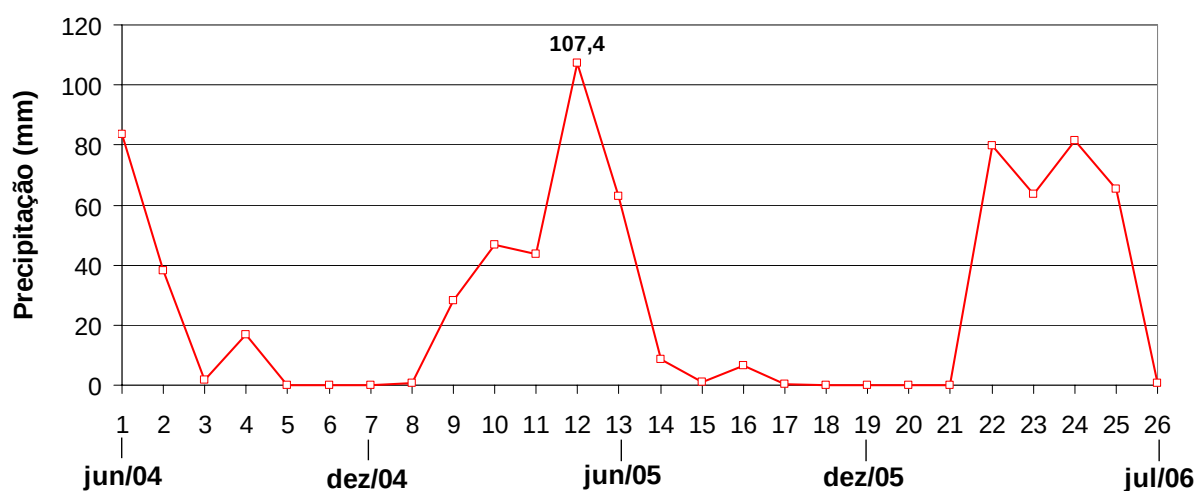


Figura 4.10. Precipitação mensal (mm) no município de Galinhos-RN no período de junho de 2004 a julho de 2006 (Estação meteorológica instalada na sede administrativa da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.).

As chuvas no município de Galinhos-RN são rápidas e de insignificante magnitude. Quanto à periodicidade, foram observadas três formas de ocorrência das chuvas, como apresentadas a seguir:

- Predominantemente: períodos de 1 a 3 horas, podendo ser intercalados por períodos de estiagem de 1 a 2 horas.
- Esporadicamente: períodos de 5 a 7 horas ininterruptos.
- Raramente: períodos com mais de 7 horas consecutivos. Durante o levantamento meteorológico ocorreram somente dois períodos em que as chuvas se

prolongaram por mais 7 horas ininterruptamente, a saber: 15 horas (10h do dia 28 de junho de 2004 às 0h do dia 29 de junho de 2004), com uma precipitação de 13,4 mm e 10 horas (22h do dia 13 de julho de 2004 às 7h do dia 14 de junho de 2004) com uma precipitação de 10 mm.

A distribuição das chuvas e a variação da temperatura média ao longo do ano mostraram estreita relação inversa, demonstrando, claramente, uma diminuição gradual da temperatura com a chegada das chuvas, ao mesmo tempo em que, nos meses de estiagem, a temperatura média aumentou, atingindo valores máximos de 29,95 °C (janeiro) (Figura 4.11).

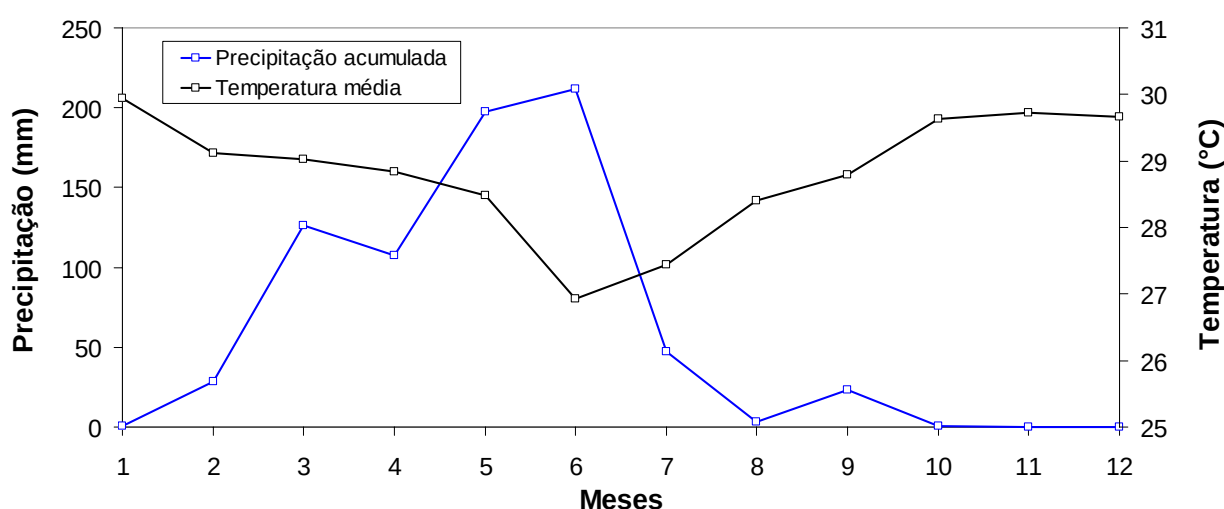


Figura 4.11. Relação entre a precipitação acumulada mensal e a temperatura média mensal no município de Galinhos-RN no período de junho de 2004 a julho de 2006 (Estação meteorológica instalada na sede administrativa da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.).

4.2.4 Unidade Relativa

A umidade relativa média anual é de 64,61 %, com médias mensais que variam entre 57,63 % (outubro) e 73,14 % (junho). Valores mensais acima da média anual ocorreram no período de fevereiro a julho. Valores abaixo da média anual ocorreram no período compreendido entre os meses de agosto e janeiro (Figura 4.12).

A relação entre a umidade relativa e a precipitação foi bem definida na região de estudo. Durante os meses de maior precipitação (março a junho), a umidade apresentou percentuais superiores a média anual (64,61 %), enquanto, nos meses de estiagem (julho a janeiro), a umidade diminuiu à valores inferiores a média anual (Figura 4.13).

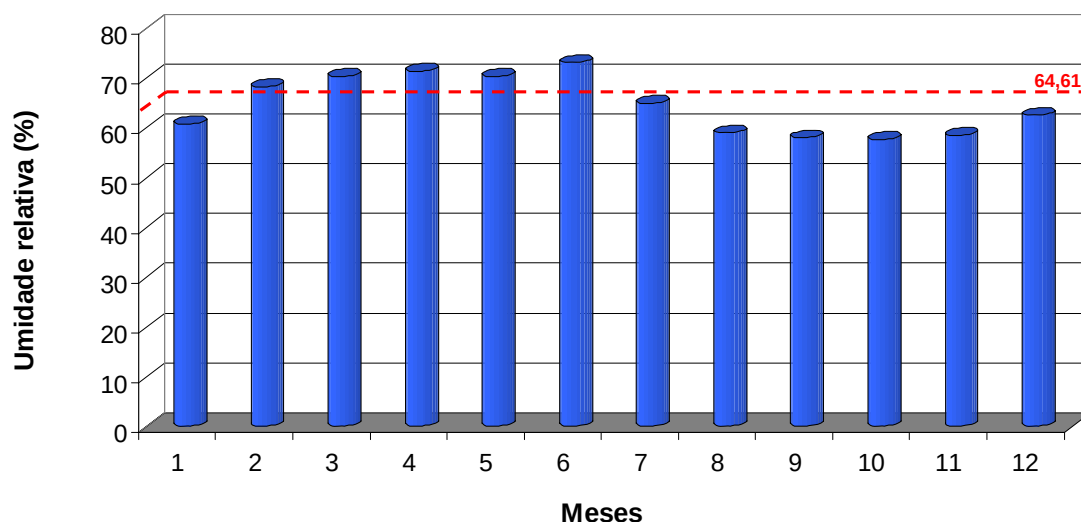


Figura 4.12. Umidade relativa mensal média e média geral (linha tracejada vermelha) no município de Galinhos-RN no período de junho de 2004 a julho de 2006 (Estação meteorológica instalada na sede administrativa da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.).

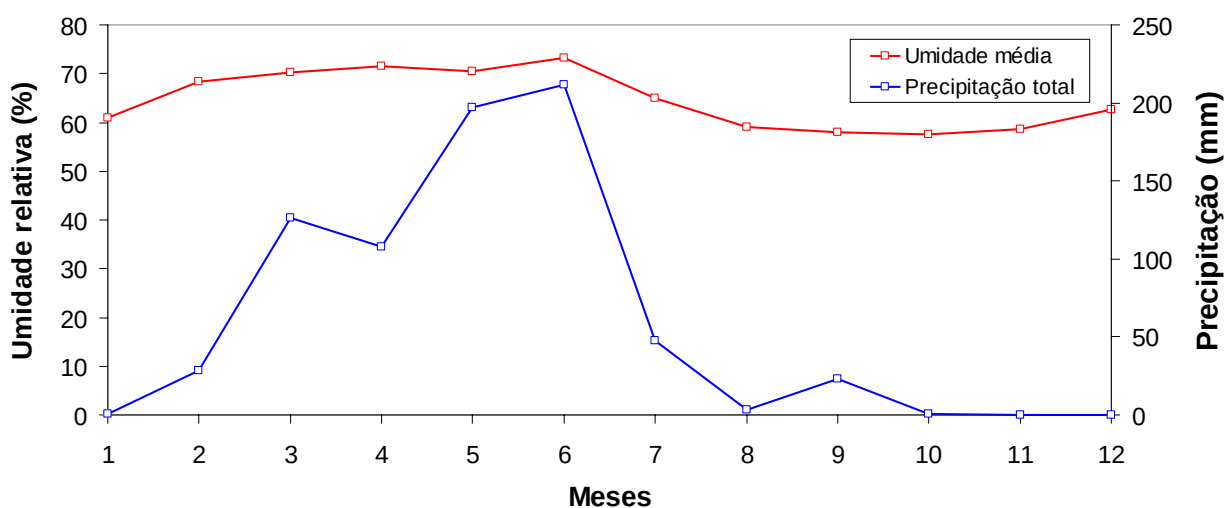


Figura 4.13. Relação mensal média entre a umidade relativa e a precipitação no município de Galinhos-RN no período de junho de 2004 a julho de 2006 (Estação meteorológica instalada na sede administrativa da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.).

4.3 DISCUSSÕES

A oscilação dos ventos nesta área apresentou velocidades relativamente elevadas com dois períodos bem definidos cujas médias mensais variaram entre 10,64 e 18,44 km/h (média para o período analisado de 15,30 km/h), a saber: um período entre os meses de março e julho, com velocidades variando de 10,64 km/h (abril) a 13,54 km/h (julho) e o outro entre agosto e fevereiro, com velocidades mais altas entre 17,00 km/h (fevereiro) e 18,44 km/h (outubro).

Cestaro (1994), estudando os elementos do clima na região de Galinhos a partir de dados da estação meteorológica de Macau (série histórica 1980-1989, DNEMET, 1992), apresenta uma média de 22,32 km/h, superior ao deste trabalho, bem como das mínimas (17,29 a 19,08 km/h) e máximas (26,28 km/h a 27,72 km/h) médias mensais. Esta variação ocorreu de março a junho (velocidades baixas) e de setembro a novembro (velocidades maiores) mostrando concordância com este trabalho.

Por outro lado, Leite (2007), estudando a influência do cisalhamento eólico na região costeira de Guamaré-RN a partir de duas estações meteorológicas no município de Macau-RN operadas pela Petrobrás (2001 a 2006) e localizadas 29 km (Macau-A) e 15 km (Macau-B) a NW da estação Camarus, constatou períodos de oscilação com pequenas diferenças, nos quais as menores velocidades ocorreram de janeiro a maio e as maiores velocidades entre julho a novembro, o que, provavelmente, deve-se às diferentes alturas entre os anemômetros (Macau-A: V1=40m e V2= 20m; Macau-B: V1= 46 m e V2= 30 m; Camarus= 11,5 m).

Quanto à direção dos ventos, ocorrem variações entre os municípios de Galinhos (Camarus) e Macau (Cestaro, *op cit*): enquanto, em Macau, predominam ventos E de agosto a abril e ventos SE somente de maio a julho, na área deste estudo, os ventos SE predominam ao longo do ano e os ventos E ocorrem associados aos ventos NE (início e final do ano) como uma terceira direção. Os ventos E, no estudo de Leite (*op cit*), ocorrem praticamente no mesmo período apresentado neste estudo e os SE estão restritos ao período de abril a setembro. Ventos NE não foram registrados.

Portanto, as variações na intensidade e direção dos ventos no litoral Norte do estado, mais precisamente entre os municípios de Macau e Galinhos, apresentam diferenças que estão relacionadas a fatores naturais e técnicos, tais como: o padrão de circulação atmosférica, a temperatura do ar, a morfologia da costa, a localização da estação e a altura dos anemômetros.

A pequena variação na direção dos ventos, em que predominam praticamente as direções SE e NE, e as velocidades relativamente altas são responsáveis pelo modelamento da zona costeira Norte do Estado, principalmente na formação e migração de campos dunares. Esta característica possibilita a exploração do potencial eólico da região para instalação de parques de produção de energia eólica, como, por exemplo, as três turbinas para geração de energia eólica instalada pela Petrobrás no município de Macau-RN. Outros parques eólicos estão programados para os municípios de Touros, Macau, Guamaré e Areia Branca (ENEBRASIL, 2002).

As pequenas amplitudes anuais de temperatura no município de Galinhos e regiões circunvizinhas durante o período estudado (média de 1,23 °C) são causadas pelas baixas altitudes, proximidade com o mar e pela baixa latitude, conforme Cestaro (1994), que apresenta, em seu estudo, uma amplitude três vezes superior a supra citada (3,6 °C). A variação de temperatura entre 26,38 e 30,58 °C é característica de regiões equatoriais, que contribui para a elevação da taxa de evaporação e provoca o aumento da salinidade da água.

Estudo realizado por Leite (2007) a partir de dados da estação meteorológica de Guamaré (EMPARN), no período de 2001 a 2004, mostra uma média mensal entre 26 a 28 °C, indicando uma boa correlação com a média de 28,44 °C deste trabalho. A temperatura mínima média anual é superior 4,08 °C em relação aos dados de Leite (*op cit*), enquanto as temperaturas máximas médias são aproximadamente iguais.

A precipitação média anual de 248,7 mm (Estação Camarus, 2004 a 2006) é inferior aos valores apresentados por Leite (*op cit*) com série história 1962-2005 (735,6 mm) e por Cestaro (*op cit*) com as séries históricas 1963-1990 (902,0 mm). Com isso, a precipitação média durante a realização desta pesquisa é importante informação que auxilia o entendimento dos processos erosivos, do transporte de sedimentos, das características hidrodinâmicas locais, da variação da salinidade da água e da classificação termohalina dos corpos aquáticos. Porém, os períodos de menor precipitação (julho a fevereiro) e maior precipitação (março a junho) mostram correlação com os apresentados por Cestaro (*op cit*). Nesse sentido, Leite (*op cit.*) relaciona a ocorrência das chuvas na região de Guamaré, ao deslocamento anual da ZCIT em relação ao Equador, bem como, as Perturbações e Ondas de Leste, aos Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (VCAS) e as brisas marítimas. Nos anos de seca (junho a dezembro), a ZCIT se posiciona ao norte do Equador, enquanto, nos anos chuvosos (janeiro a junho) se desloca para sul do Equador, até a latitude sul de 6° 30' (Coelho *et al.*, 2004), quando ocorrem as chuvas na região desse estudo (litoral setentrional do Rio Grande do Norte).

A umidade relativa (57,63 % em outubro e 73,14 % em junho) mostra boa correlação com os percentuais apresentados por Leite (*op cit*) e Cestaro (*op cit*), bem como sua variação ao longo do ano. Na área em estudo, a umidade relativa mostra boa correlação com a temperatura e precipitação, com médias mensais superiores a média anual no período das chuvas e médias mensais inferiores à média anual no período de estiagem.

5 BATIMETRIA, MORFOLOGIA E FORMAS DE LEITO DO SISTEMA PISA SAL

Este capítulo apresenta os resultados sobre a configuração batimétrica, a geomorfologia e a morfologia de fundo do sistema Pisa Sal obtidos a partir de levantamento de sondagens ecobatimétricas, sonogramas e descrições de campo.

Atualmente, a utilização de sondagens ecobatimétricas e de sonar de varredura lateral associadas à faciologia de fundo vêm sendo utilizadas por diversos autores na interpretação da morfologia de fundo e das formas de leito, seja em ambiente marinho seja em ambiente estuarino (Vital *et al.* 2001, Frazão *et al.*, 2003, Souza, 2004, Tabosa, 2006 e Vital *et al.* 2008).

5.1 ECOBATIMETRIA

O levantamento batimétrico foi realizado nos dias 31/07, 27/08, 28/08 e 18/09/2004, totalizando aproximadamente 41 km de perfis, distribuídos da seguinte forma: canal Pisa Sal (25,7 km), canal Galinhos (12 km) e canal Volta do Sertão (3,3 km) (Figura 5.1). Os levantamentos seguiram uma malha de amostragem de 50 x 50 m, além de dois perfis longitudinais de controle no canal Pisa Sal (10,7 km). Nos locais escolhidos para detalhamento da batimetria, o espaçamento dos perfis transversais foi de 25 m, como, por exemplo, no canal Pisa Sal, em frente aos canais de despesca da fazenda de criação de camarão da Camarus. Na região das cabeceiras e ao longo dos pequenos canais, que apresentam larguras de 10 a 15 m e profundidades inferiores a 1 m, o levantamento foi realizado em um ou dois perfis, geralmente ao longo das suas porções mais profundas.

Os dados batimétricos foram obtidos, utilizando um ecobatímetro da marca FURUNO, modelo 1650 F, com frequência do pulso sonoro de 200 kHz, resolução vertical de 0,01 m, intervalo de amostragem a cada 1 segundo e calado do transdutor variando de 0,5 a 1,0 m, o qual foi instalado em uma embarcação tipo “lagosteiro” com aproximadamente 5 m de comprimento. A calibração da ecossonda foi realizada antes do início de cada sondagem com base na velocidade de propagação do som de 1500 m/s e verificada a profundidade com disco de Secchi com cabo graduado. O posicionamento dos pontos amostrados foi realizado pelo sistema Diferencial Global Positions System (DGPS), acoplado ao ecobatímetro, a partir da estação de rádio farol do Cabo do Calcanhar, Touros-RN (latitude de 05°10' S e longitude 35°29' W)

pertencente à marinha do Brasil, que opera na frequência de 305,0 kHz. As coordenadas dos pontos estão no sistema UTM e referenciados ao datum horizontal WGS 84. Os dados de coordenadas e profundidades foram capturados acoplado-se a ecossonda à porta COM 1 do *notebook* e utilizando o seu sistema de comunicação via hiper terminal.

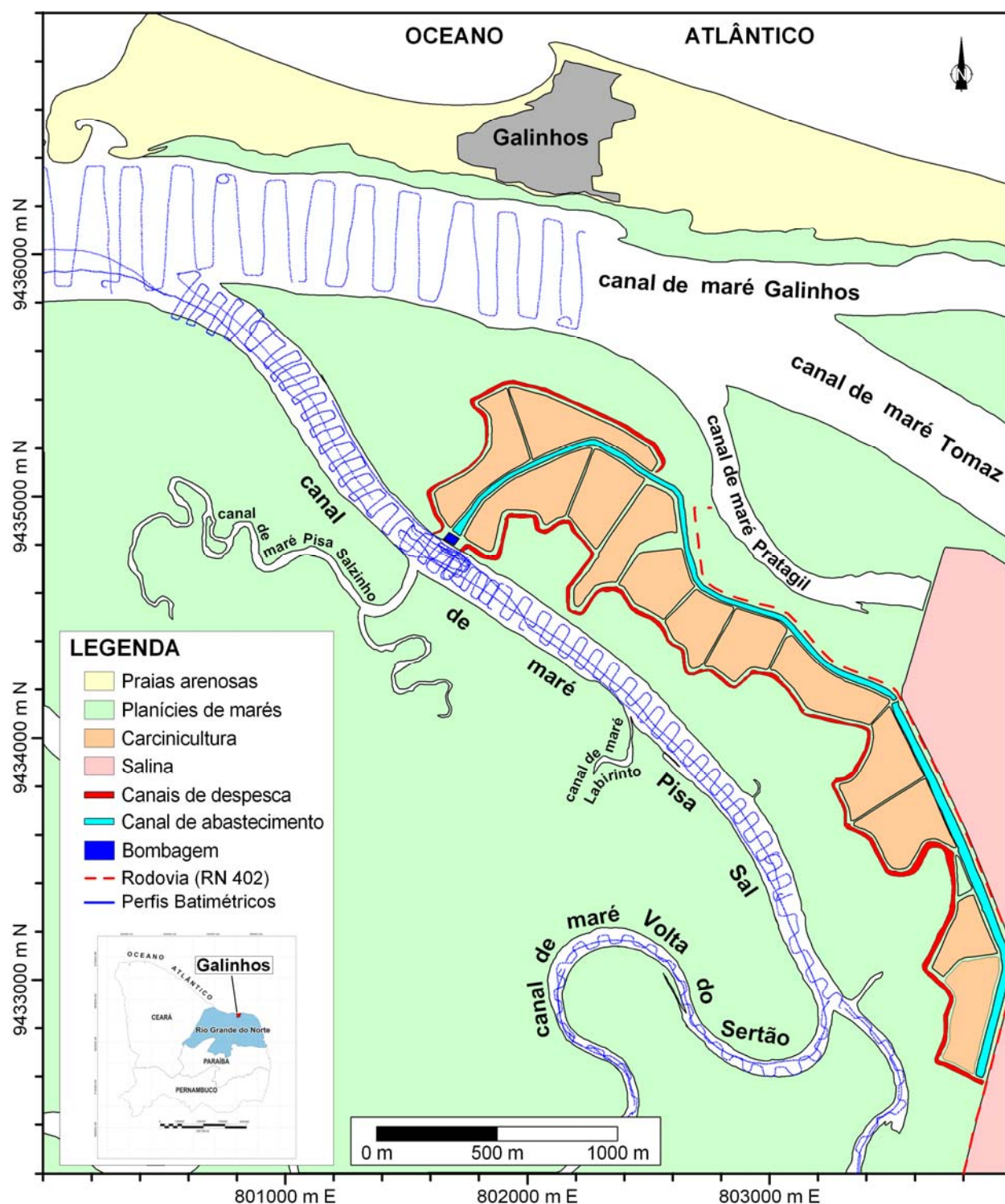


Figura 5.1. Mapa de localização das sondagens batimétricas no sistema Pisa Sal (Galinhos-RN) realizadas nos meses de julho, agosto e setembro de 2004.

5.1.1 Redução da Maré

Simultaneamente ao levantamento batimétrico, foram coletados dados da variação da maré a partir da régua instalada pelo DG/PPGG/UFRN no porto de Guamaré/RN (5° 6,5' S e 36° 19' W) de propriedade da PETROBRAS com nível de redução de 46,85 cm (Figura 5.2). A figura 5.3 mostra a variação da maré durante a realização das sondagens ecobatimétricas. Todas as profundidades foram reduzidas ao datum constante do porto de Guamaré, onde o zero relativo se aproxima do zero absoluto, estabelecido pra o nível de águas médias mais baixas da maré de sizígia.

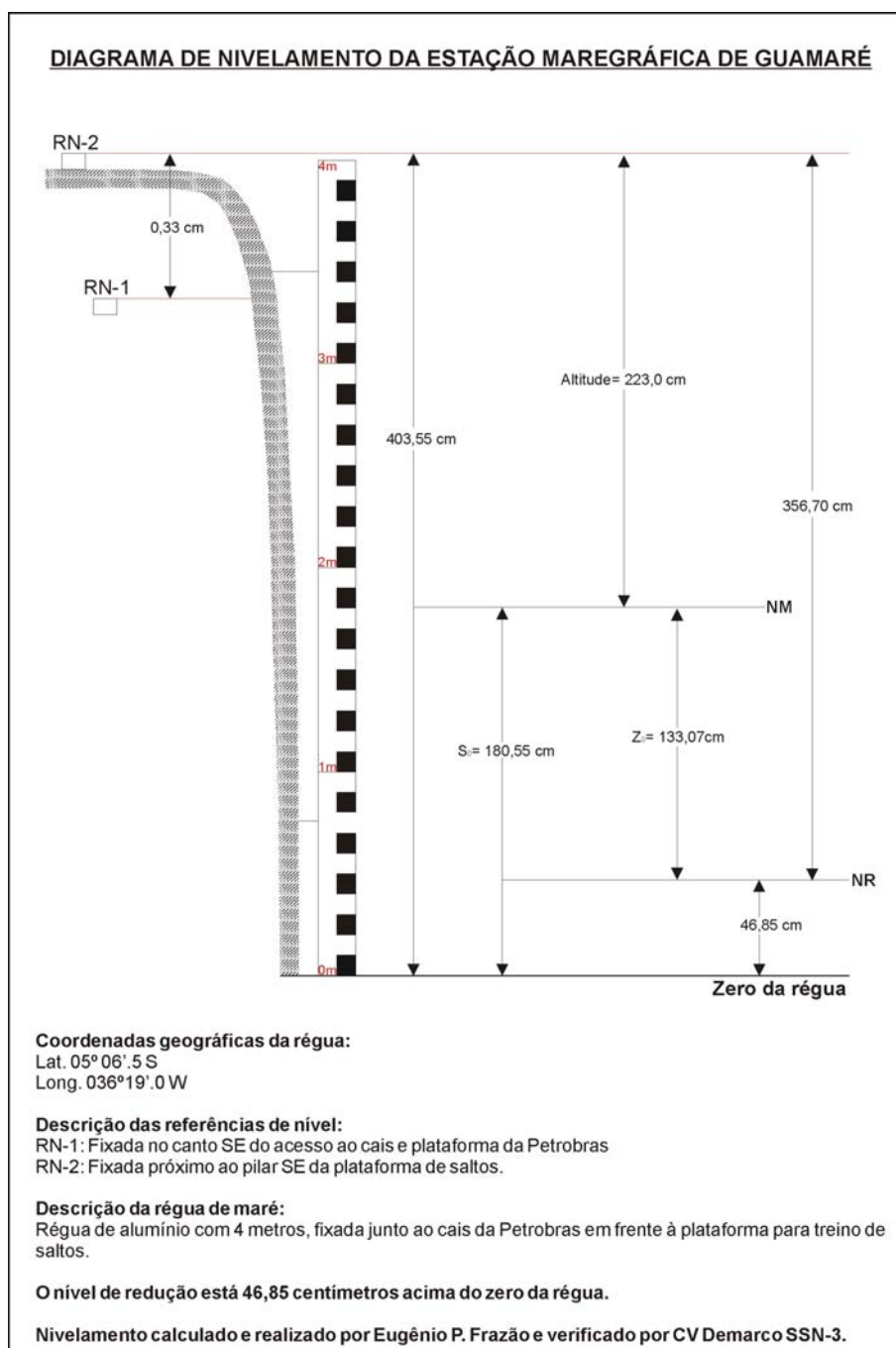


Figura 5.2. Diagrama de nivelamento da estação maregráfica do porto de Guamaré/RN (PETROBRAS).

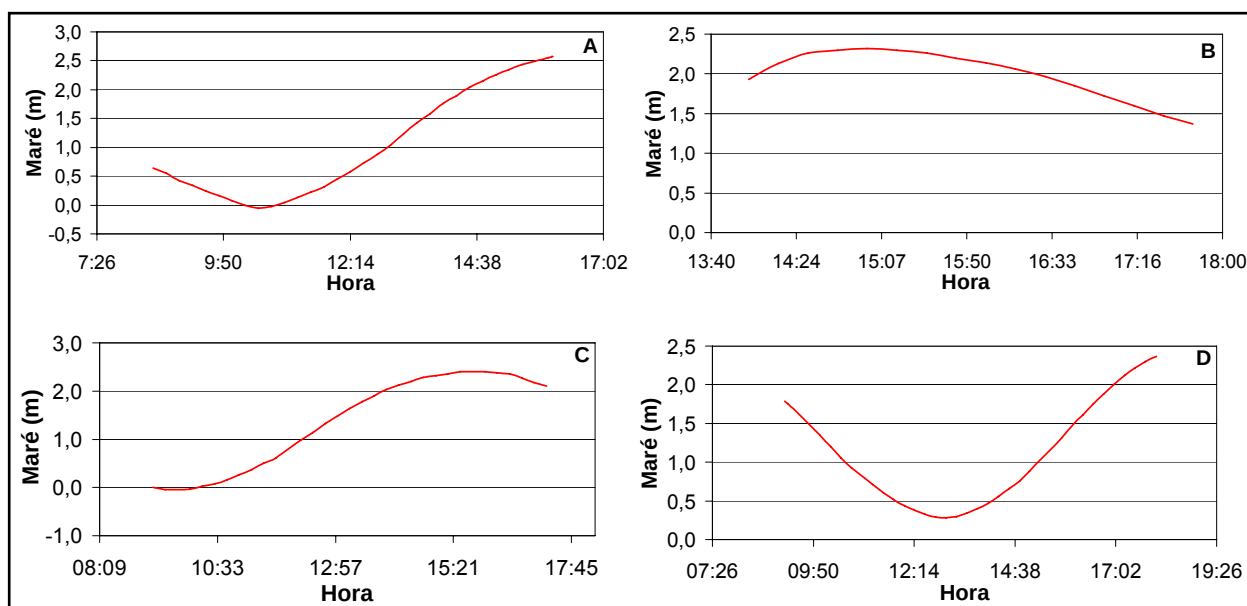


Figura 5.3. Variação da amplitude das marés durante a sondagem batimétrica: 31/07/2004 (A), 27/08/2004 (B), 28/08/2004 (C) e 18/09/2004 (D)

5.1.2 Tratamento Estatístico

O banco de dados batimétricos é constituído por uma tabela de coordenadas XYZ que representa as variáveis: coordenadas UTM Leste, coordenadas UTM Norte e profundidade (m). Esses dados foram importados para o ambiente SIG, georreferenciados segundo o datum WGS 84 (Zona 24 S) e convertidos em *shapefile*.

Análises geoestatísticas foram realizadas, utilizando-se a técnica de interpolação matemática da krigagem ordinária para a análise espacial dos pontos. Neste trabalho, para a geração do mapa batimétrico, foi observado o erro entre as medidas de batimétricas recolhidas em campo e as medidas de batimétricas calculadas pelo interpolador. Para isso, foi gerada uma tabela de validação cruzada após a krigagem, na qual está registrada esta diferença.

Levando em consideração a precisão do ecobatímetro, foram expurgados todos os pontos com erro superior a 1,0 m para mais ou para menos. A partir desta filtragem de pontos, foi então gerada a superfície batimétrica em uma nova krigagem. Os parâmetros utilizados para a interpolação estão apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1. Variáveis geo-estatísticas das krigagens 1 e 2 realizadas no banco de dados batimétricos.

VARIÁVEIS	Krigagem 1	Krigagem 2
Nº de amostras	13.204	12.941
Método	Esférico	Esférico
Direção	130°	139°
Ângulo de tolerância	44°	49°
Largura dos lags*	5,0 m	6,0 m
Tamanho dos lags	4,7772 m	6,0539 m
Nº de lags	12	12
Erro máximo	+ 2,1191	+ 1,0
Erro mínimo	- 1,3829	- 1,0

* Distância entre pares de pontos amostrados.

Nas figuras 5.4 e 5.5, estão dispostos os semi-variogramas e os mapas de variabilidade em duas dimensões, gerados na extensão do *software* utilizado, que auxiliaram os ajustes variográficos.

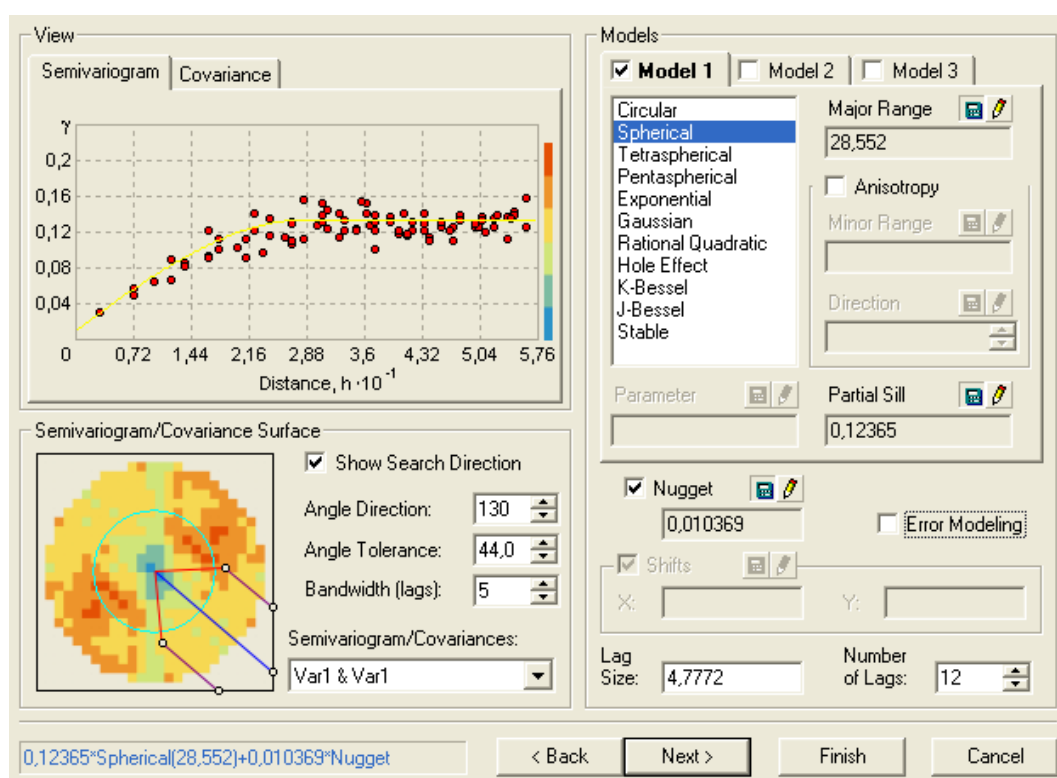
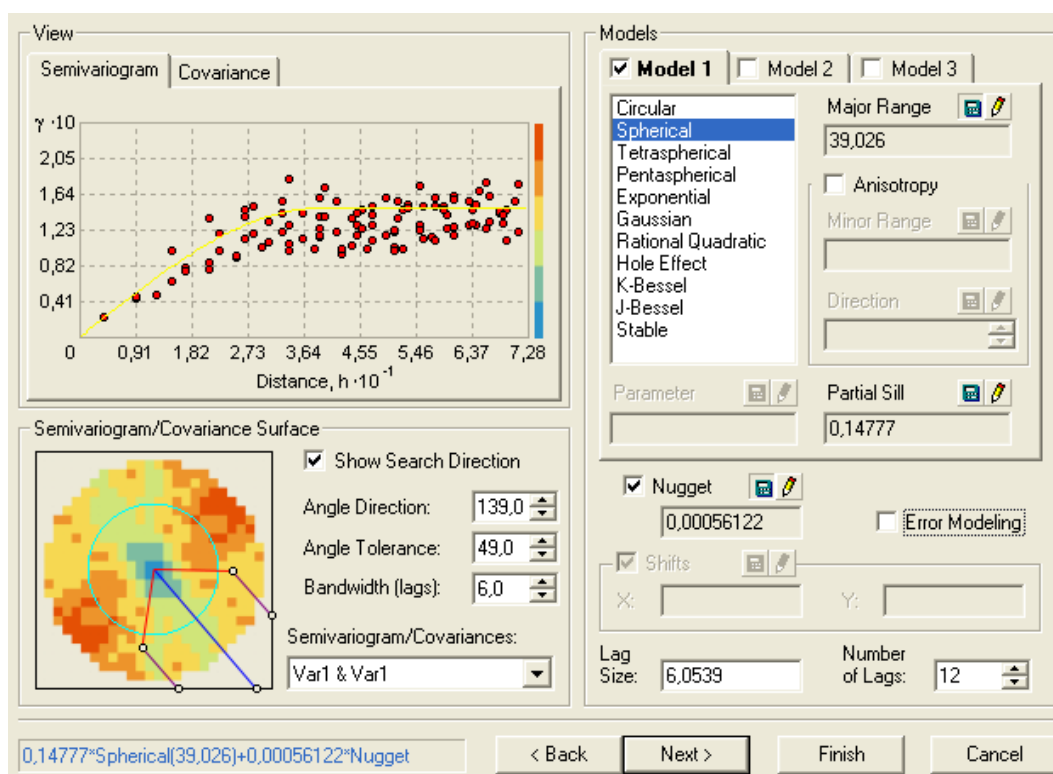


Figura 5.4. Semivariograma e mapa de variabilidade amostral da krigagem 1.



5.5. Semivariograma e mapa de variabilidade amostral da krigagem 2.

A krigagem resultou em um *grid* com *pixels* de 1,0 m x 1,0 m, evitando a clusterização dos valores em *pixels* com dimensões superiores a da malha amostral. Este *grid* serve de base para construção de modelos digitais de terrenos (MDTs) e possibilita análises tridimensionais da área em estudada.

5.1.3 Batimetria e Morfologia do Sistema Pisa Sal

A figura 5.6 mostra o mapa batimétrico do sistema Pisa Sal onde foram identificadas as seguintes feições: canal principal, canais artificiais e bancos lamosos e arenosos. O referido mapa também contempla a parte do canal de Galinhos ao largo da desembocadura do Pisa Sal.

5.1.3.1 Canal Principal

A calha do canal Pisa Sal está orientada SE-NW, apresenta sinuosidade de 1,2 m/m (canal reto), extensão de 8,0 km, largura que varia de 225,0 m na desembocadura e 5,0 m na cabeceira (média de 150 m) e profundidade variando de 0,66 a -4,34 m. O perfil longitudinal é bastante regular com gradiente horizontal, evidenciado nos 3.338 m entre as estações E1 (desembocadura) e E3 (cabeceira) cujas profundidades são de 3,87 e 3,78 m ($\Delta P = 0,09$ m) (Figura 5.6).

As maiores profundidades ocorrem nas desembocaduras do Pisa Sal e do Pisa Salzinho e após o encontro do Pisa Sal com o canal Volta do Sertão (Figura 5.6).

A morfologia do perfil transversal varia ao longo do curso do canal em cuja desembocadura e porção intermediária apresenta configuração em “U” (Figura 5.7A e B) e na região da cabeceira, configuração em “V” (Figura 5.7C). Os gradientes das margens tornam-se mais fracos em direção à montante, com valores de 1:23 a 1:25 (Figura 5.7, E1/perfil AA’), 1:47 a 1:54 (Figura 5.7, E2/perfil BB’) e 1:59 a 1:61 (Figura 5.7, E3/perfil CC’).

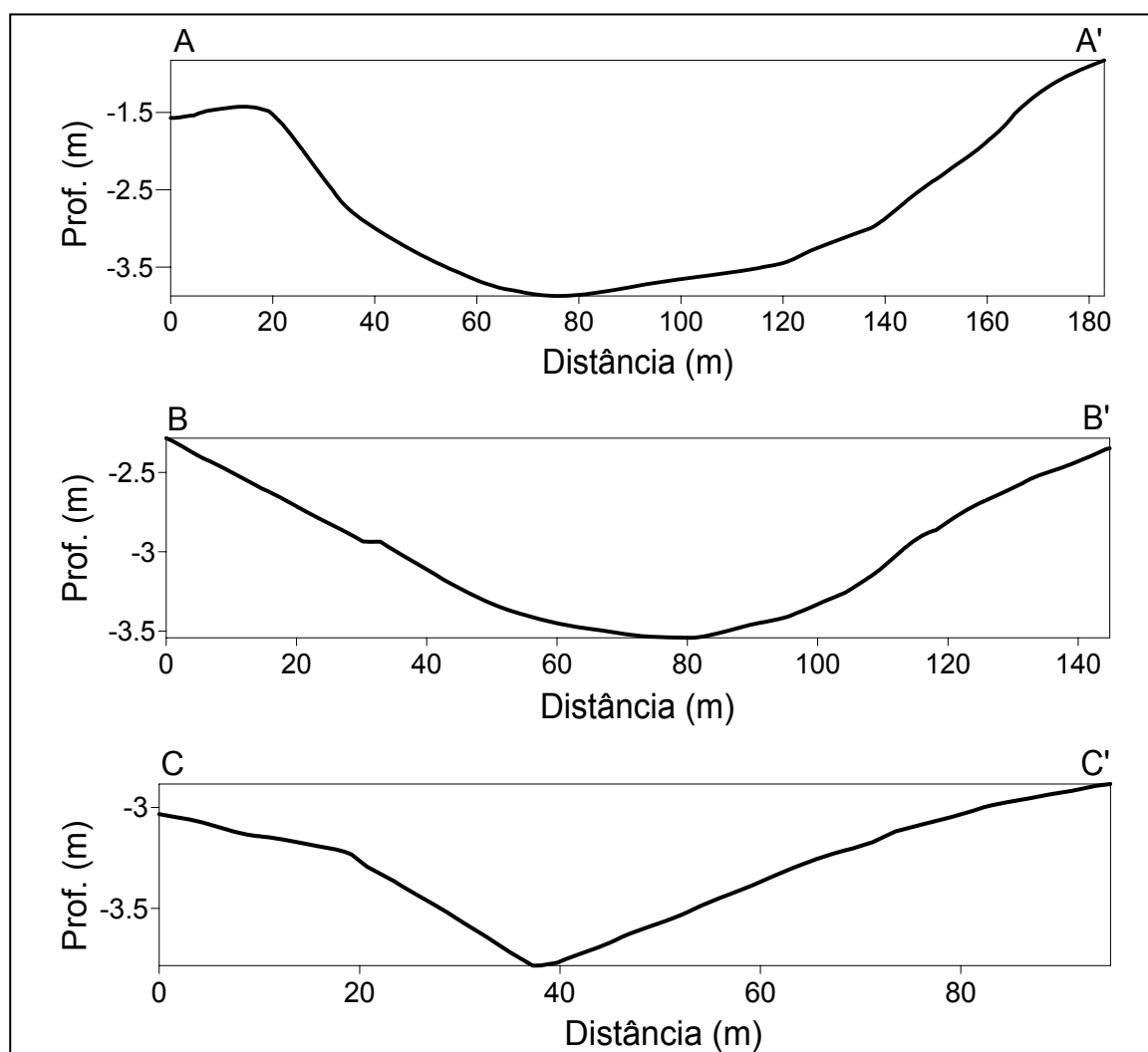


Figura 5.7. Perfis batimétricos transversais às estações oceanográficas E1 (AA'), E2 (BB') e E3 (CC'). A localização dos perfis está na figura 5.6.

O canal Volta do Sertão possui configuração meandrante com sinuosidade igual a 1,9 m/m (canal sinuoso), extensão de 3,4 km e profundidades entre -2,0 e 0,0 m. Nas margens convexas, ocorrem barras em pontais de canais de marés (Figura 5.6).

Na transição do canal Pisa Sal para o canal de Galinhos, a profundidade aumenta de 1,9 m para 4,2 m ($\Delta P = 2,3$ m) (Figura 5.6), além de estar associada à formação de bancos arenosos.

Dois pequenos canais vêm sendo modelados no leito do canal Pisa Sal, especificamente, na sua margem direita, após à escavação dos canais de pesca (CD1 e CD2). Estes pequenos canais estão sendo esculpidos pela ação das correntes de maré vazante que atuam nestes CDs e que são mais velozes que as correntes de vazante das margens do Pisa Sal. O canal na desembocadura CD1 apresenta largura de 2 m (base) a 10 m (superfície), extensão aproximada de 76,0 m e profundidade máxima de -1,24 m (Figura 5.8).

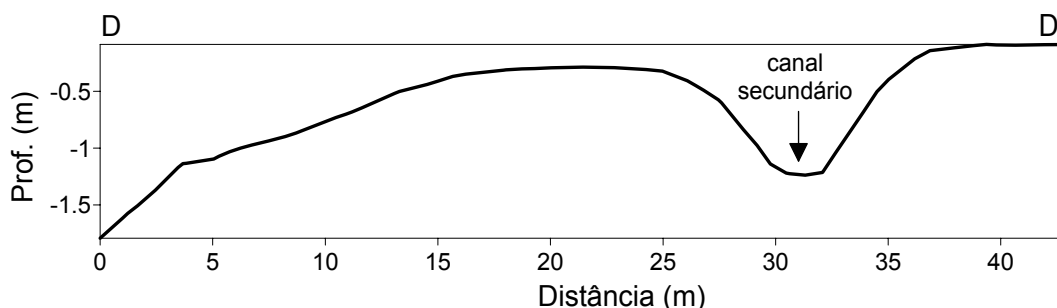


Figura 5.8. Perfil batimétrico (DD') do canal secundário esculpido no leito do Pisa Sal. A localização do perfil está na figura 5.6.

Outra feição que também ocorre na calha principal do Pisa Sal são depressões de forma alongada localizadas à jusante da desembocadura dos canais de marés secundários que desaguam no rio Pisa Sal, principalmente na região de encontro do canal Pisa Sal com Volta do Sertão e do canal Pisa Salzinho e Pisa Sal, com profundidades que variam de -3,5 a -4,34 m (Figura 5.6).

5.1.3.2 Canais Artificiais

Foram escavados artificialmente nas planícies de intermaré e supramaré da margem direita do canal Pisa Sal dois canais (CD1 e CD2) com forma geométrica retangular, largura de 10,0 m e profundidade de 2,5 m, com comprimentos respectivos de 4.900 m e 1.700 m (Figura 5.6 e 5.9) e gradientes longitudinais de 1:1.907 e 1:2.298. Estes canais são utilizados no descarte dos efluentes dos viveiros da empresa Camarus durante o processo de captura (despesca) do camarão.

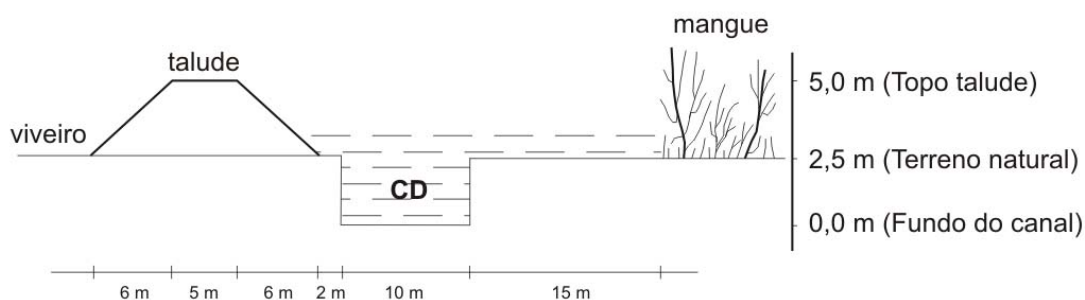


Figura 5.9. Configuração e dimensões dos canais de despesca (CDs) e taludes da fazenda de criação de camarões da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.

A forma original destes canais foi modificada devido à ação dos fenômenos de erosão e sedimentação. Estes canais apresentam atualmente formas, aproximadamente, trapezoidal ou triangular. A largura destes canais varia de 14,5 a 20,0 m e a profundidade média varia de 1,3 a 2,5 m. A profundidade e a largura na desembocadura do CD1 é 1,7 m e 13,51 m, enquanto no CD2 é 1,4 m e 15,66 m (Figura 5.10).

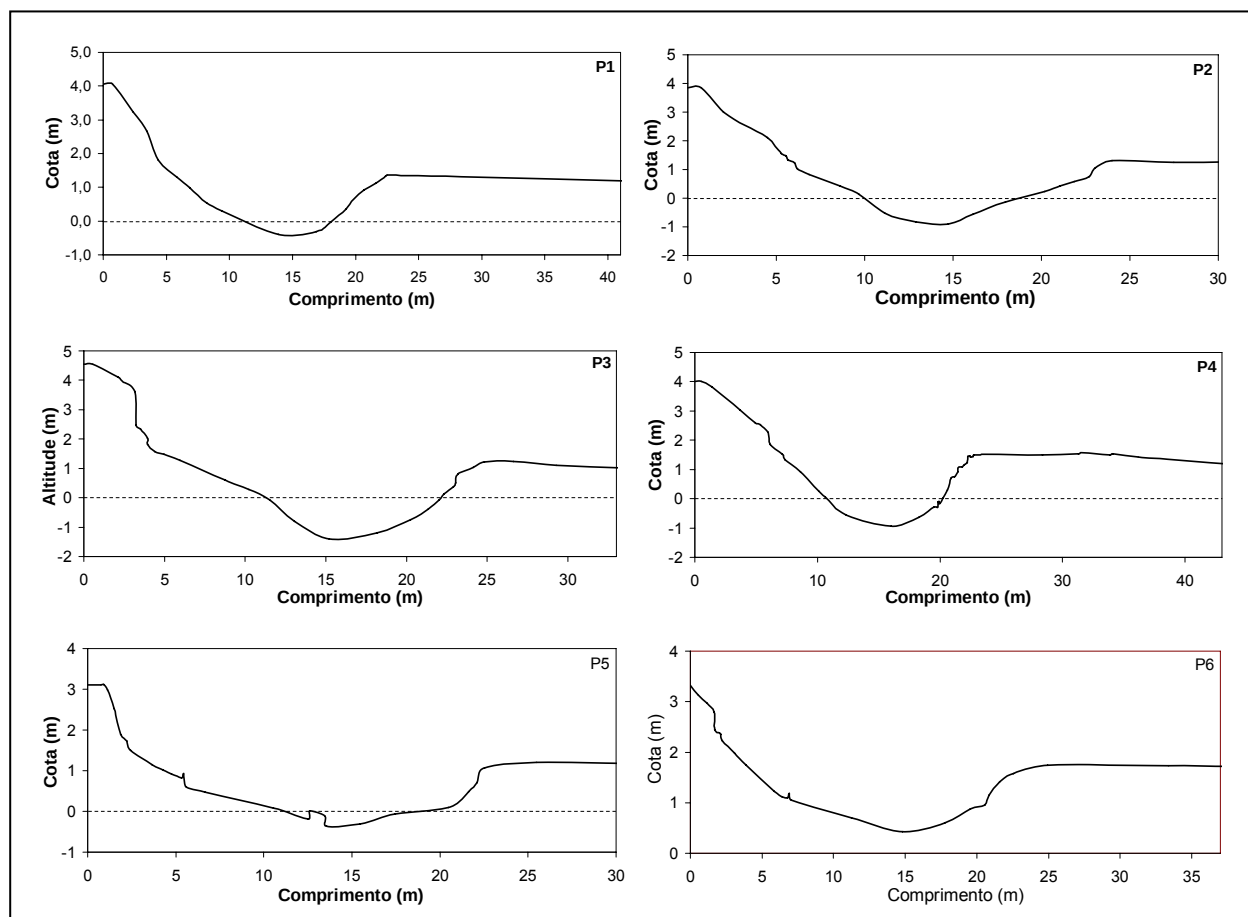


Figura 5.10. Morfologia dos canais de despesca (CDs) nos pontos de monitoramento topográfico. Os perfis de P1 a P2 estão localizados no CD2 e os perfis de P3 a P6 no CD1.

A penetração das marés ocorre em toda sua extensão devido à livre abertura da sua desembocadura, conferindo-lhes um comportamento de canal de maré; uma vez que nas marés de sizígia, o canal é totalmente inundado, bem como a planície de supramaré adjacente.

Na calha dos canais, predomina forma de leito tipo fundo plano, quando associada aos sedimentos lamosos e forma de leito tipo marca de onda, quando associada aos sedimentos arenosos.

5.1.3.3 Bancos Arenosos e Lamosos

No sistema Pisa Sal, ocorre formação de bancos arenosos e lamosos que estão relacionados a barras em pontais e barras de acreção vertical. Como não existe fluxo fluvial para o sistema, o mecanismo que controla a formação destes bancos é a corrente de maré.

Nas margens convexas dos meandros do canal Volta do Sertão (Figura 5.6), ocorrem depósitos de barras em pontal de composição lamosa na sua porção superior e arenosa na porção inferior. Esta última é formada pela migração de dunas de areias 3D de grande comprimento. Apresenta topo regular com inclinação em direção à calha do canal. Apresentam largura máxima de aproximadamente 30 m e profundidade de 1,0 m (Figura 5.6 e 5.11). Na margem côncava, ocorre erosão acentuada.

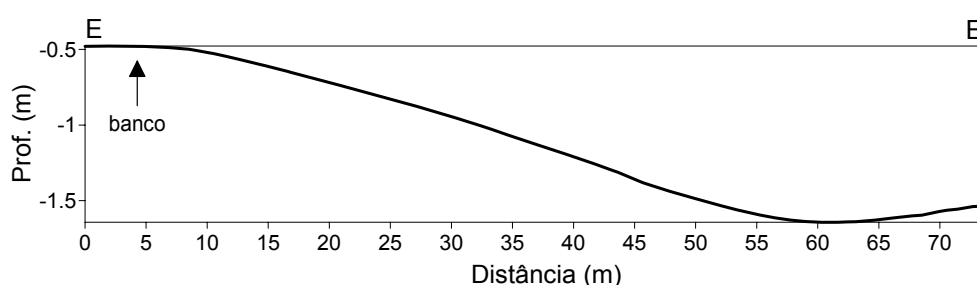


Figura 5.11. Perfil batimétrico (EE') da barra de pontal no canal Volta do Sertão. A localização do perfil está na figura 5.6.

Na margem esquerda, suavemente convexa, do canal Pisa Sal, bancos lamosos são formados por acreção vertical e migração lateral em direção à calha do canal. O mecanismo que força essa sedimentação é a redução da velocidade das correntes de marés devido à presença de desembocaduras de canais de marés, tais como o canal do Pisa Salzinho e do Labirinto. Na mesma margem, também ocorre a formação de bancos arenosos de comprimento que varia de 60 a 80 m e largura de 13 a 20 m (Figura 5.6).

Na região de confluência do canal Pisa Sal com o canal de Galinhos, a profundidade diminui devido à presença de um banco areno lamoso que adquire a forma de uma “soleira” sedimentar conectando as duas margens. Este banco forma-se pelo acúmulo de sedimentos trazidos pelo Pisa Sal e que são barrados pelas correntes mais fortes do canal de Galinhos. A transição para o canal de Galinhos é marcada pelo aumento da profundidade de 1,9 m para 4,2 m ($\Delta P = 2,3$ m) (Figura 5.12).

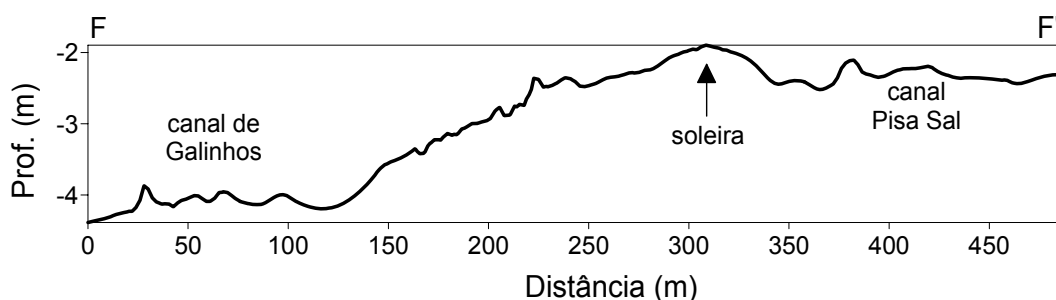


Figura 5.12. Perfil batimétrico longitudinal no sentido canal de Galinhos-Canal Pisa Sal (HH') mostrando a soleira sedimentar. A localização do mapa está na figura 5.6.

Em frente à desembocadura do CD1 e do CD2, ocorrem bancos areno lamosos com grande desenvolvimento de colônias de bivalves. O CD1 apresenta comprimento e largura de respectivamente 38 m e 20 m (Figura 5.13, Perfil GG'), enquanto, no CD2, estas dimensões são 22 m e 14 m (Figura 5.13, perfil HH'). A formação destes bancos está associada à ação das correntes de vazante nos CDs, cujas velocidades são mais elevadas ou aproximadamente iguais a das margens do canal Pisa Sal que bloqueiam a passagem de sedimentos.

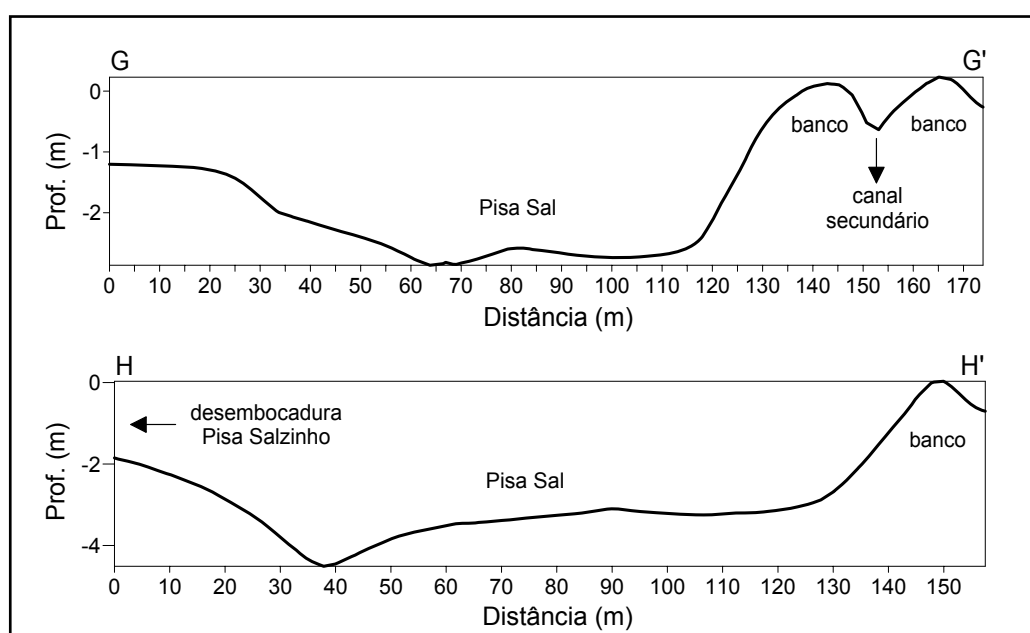


Figura 5.13. Perfis batimétricos transversal ao canal Pisa Sal mostrando os bancos na desembocadura do CD1 (GG') e CD2 (HH'). A localização dos perfis está na figura 5.6.

5.2 SONOGRAFIA

O levantamento com sonar de varredura unilateral (*side scan sonar*) foi realizado nos seguintes períodos: 3 de julho de 2004 e 17 e 18 de setembro de 2004 ao longo dos canais Pisa Sal e em parte do rio Volta do Sertão. Foram executados 3 perfis orientados longitudinalmente aos canais e nas suas porções centrais (Figura 5.14), uma vez que apresentam profundidade relativamente baixa, com extensão média de 4,3 km, totalizando 14 km de perfilagem.

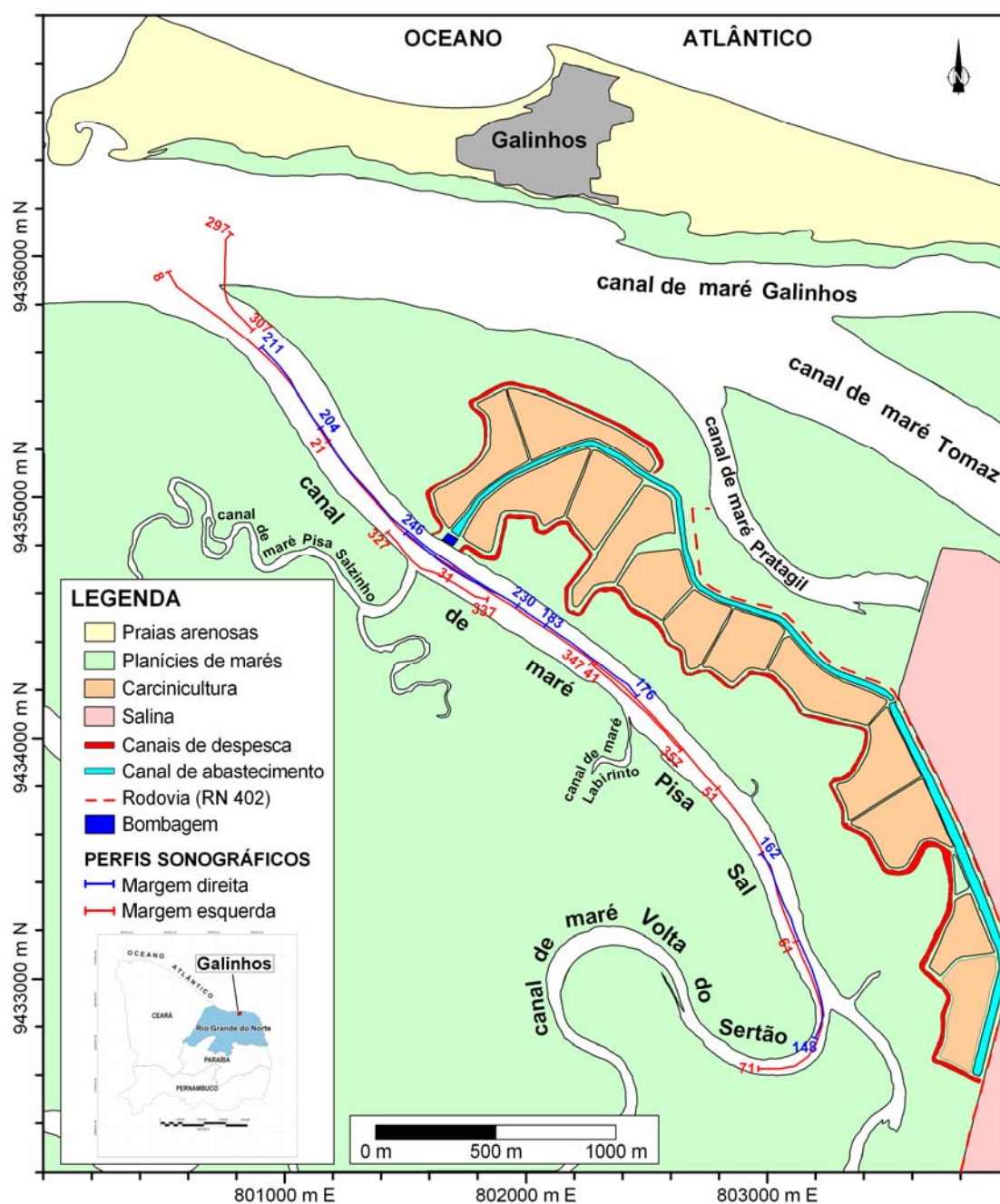


Figura 5.14. Mapa de localização dos perfis sonográficos realizados no rio Pisa Sal com um sonar de varredura lateral modelo *HYDROTRAC* da marca *Odom Hydr.ographic Systems*.

O equipamento utilizado é da marca *Odom Hydrographic Systems*, modelo *HYDROTRAC*, que opera numa frequência baixa de 200 kHz, registrando num gravador de papel térmico (sonograma), com 8 tons diferentes de cinza, dispondo de uma resolução de 0.01m, acoplado em embarcação tipo “lagosteiro” (Figura 5.15). Os *ranges* de varredura lateral foram definidos em função da profundidade, da largura dos canais e da distância do recobrimento em relação às margens. Os sonogramas foram convertidos em imagens de alta resolução na extensão TIF, editados e interpretados. Padrões de tonalidade escura (reflexão forte) estão associados a fundos lamosos ou rochosos, enquanto tonalidades claras (reflexão fraca) associam-se a fundos arenosos, cascalhosos ou mistura destes.

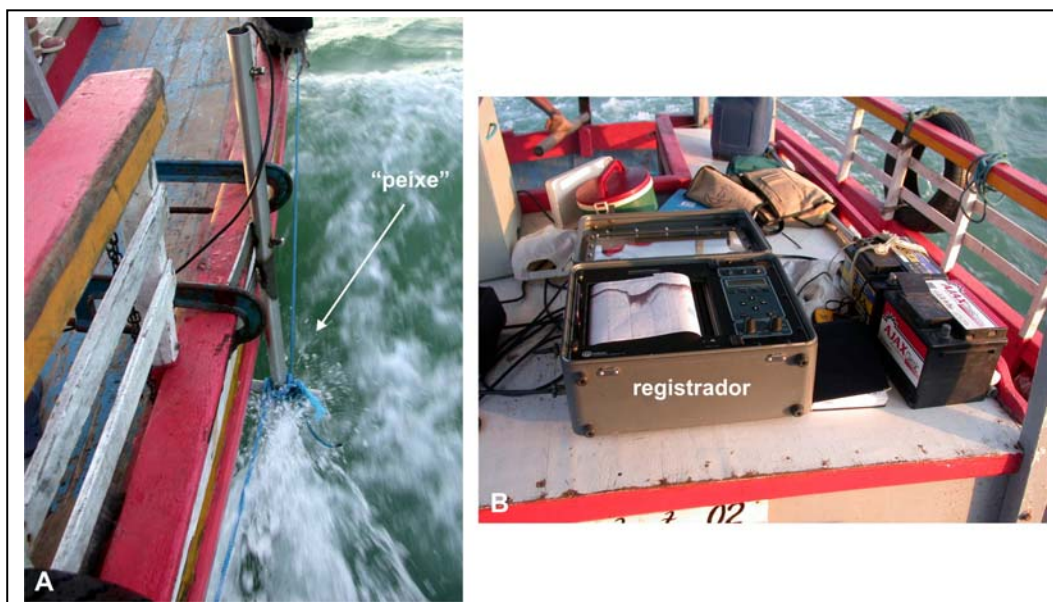


Figura 5.15. Sistema de sonar de varredura unilateral da marca *Odom Hydrographic Systems* (modelo *HYDROTRAC*), mostrando o transdutor (“peixe”) imerso na água (A) e o registrador/sonograma (B).

Os comprimentos de ondas das formas de leito nos sonogramas foram encontrados a partir das marcações dos pontos de sondagens (*tops*) e das coordenadas UTM desses pontos plotados no software ArcGis 9.0. As distâncias paralelas ao levantamento (x = longitudinal ao canal) variaram em função da velocidade da embarcação, sendo registradas as seguintes medidas: 40 m (03/07/2004), 70 m (17/09/2004) e 55 m (18/09/2004). As distâncias transversais ao levantamento (y = perpendicular ao canal) foram extraídas dos sonogramas conforme as escalas de varredura lateral utilizadas, as quais variaram entre 10 e 20 m.

As alturas das formas de leito foram determinadas a partir da relação entre o comprimento (L) e a altura (H) estabelecida por Flemming (1988), a saber: $H = 0,0677 L^{0,8098}$. Foi necessário utilizar esta relação, uma vez que os sonogramas não mostram qualidade para determinação das sombras acústicas (L_s) das marcas de leito para posterior aplicação na determinação das suas alturas (H), a partir da relação: $H = H_f \times L_s / R_s + L_s$ (H_f = altura do peixe rebocado acima do fundo e R_s = distância inclinada do peixe até a forma de leito). Nos trabalhos de campo, a coleta dos dados de comprimento de ondas e altura foi realizada durante a maré baixa, utilizando trena e régua graduada perpendicularmente a crista/cavas das formas de leito.

5.2.1 Formas de Leito

Grandes formas de leito podem ocorrer em diferentes ambientes geológicos, a saber: rios, estuários dominados por marés e plataforma continental. Por esse motivo, vários tipos de classificações foram propostos ao longo do tempo, tais como A.S.C.E. Task Force (1960) e Smith (1978) que se baseava principalmente na morfologia, não considerando a canalização, as flutuações do nível da água e os fluxos instáveis e reversos (Ashley, 1990).

Estudos realizados por Van Rijn (1984c) classificam as formas de leito segundo dois parâmetros adimensionais: parâmetro de partícula (D^*) e o parâmetro de transporte (T), que caracterizam os seguintes tipos: fundo plano (sem movimento), marcas de ondas, dunas e fundo plano (regime de fluxo superior). Estes parâmetros serão detalhados no Capítulo 9 - Transporte de Sedimentos no Sistema Pisa Sal.

Posteriormente, os estudos de Boguchwal e Southard (1990) utilizam além da morfologia, o tamanho dos sedimentos (mediana) e a velocidade média do fluxo, estabelecendo limites para o início do movimento das partículas, definindo os tipos de formas de leito e delimitando as zonas de transição entre elas (Figura 5.16).

Segundo Ashley (*op cit*), a geração das grandes formas de leito de fluxo transversal em ambientes arenosos modernos deve obedecer aos seguintes requisitos: (1) profundidade da água maior que 1 metro, granulometria dos sedimentos maior que 0,15 mm (areia muito fina) e velocidade média da corrente superior a 0,4 m/s.

Nos embaiamentos costeiros dominados por marés, mais especificamente, nos estuários e lagunas, as correntes de marés são instáveis, ocorrendo aumento ou redução das suas velocidades com as fases de enchente e vazante, ocasionando no

fluxo da água e no transporte de sedimentos um direcionamento tanto para fora como para o interior do estuário (Ashley *op cit.*).

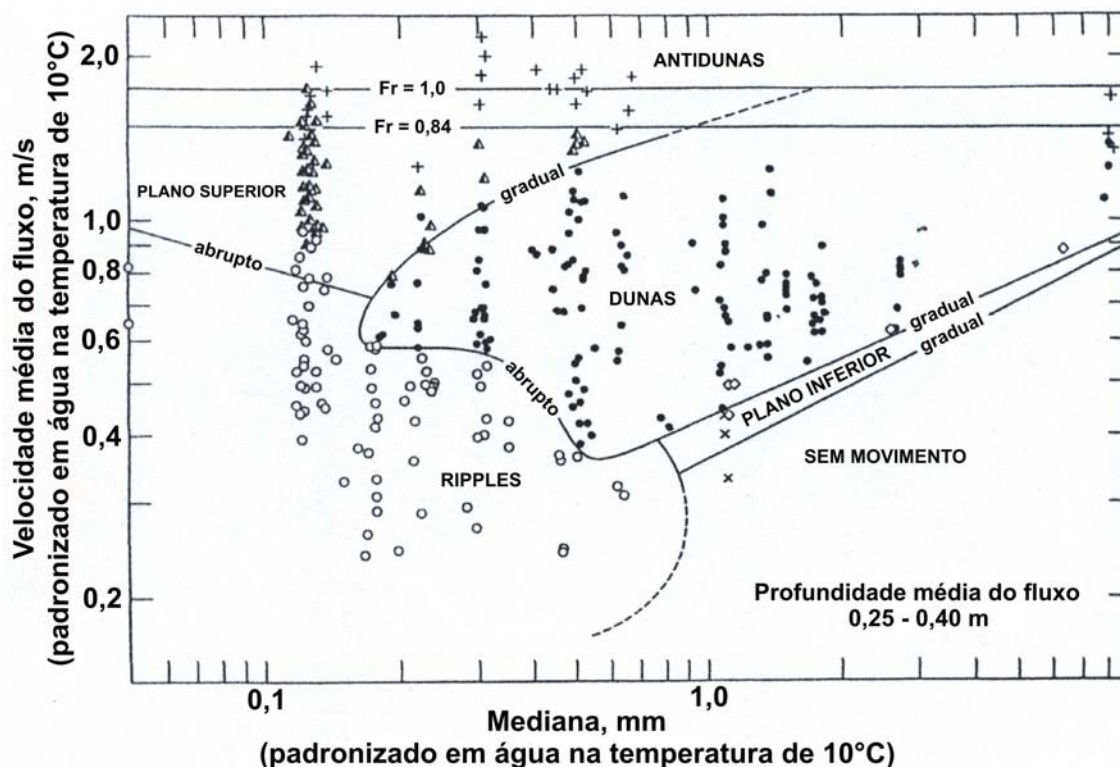


Figura 5.16. Diagrama da velocidade média do fluxo versus mediana (Ashley, 1990). A velocidade e o tamanho dos sedimentos foram padronizados em água na temperatura de 10°C.

Nos ambientes sob influência das marés, formas de leito com espaçamento de poucos metros podem mudar continuamente sua orientação durante o ciclo de maré. Por outro lado, as grandes formas de leito que acumulam grande quantidade de sedimentos não sofrem essa mudança, entretanto comportam-se como plataforma para a migração de pequenas formas, tais como as formas de leito de pequena escala e as *ripples* (Ashley, 1990).

A combinação da variação espacial do fluxo que mostra diferentes formas durante as marés de enchente e de vazante e a sua variação temporal (diária e ciclo de sizígia e quadratura) nesses ambientes provoca a formação de importantes estruturas no registro geológico decorrentes da migração das formas de leito, como por exemplo: estratificação “espinha de peixe”, reativação de superfícies e *tidal bundles* (Ashley, *op cit*), as quais são importantes para as interpretações sobre paleohidráulica e paleomarés, as quais podem ser identificadas em ambientes recentes sob influência das marés.

A diversidade e complexidade das grandes formas de leito subaquosas transversais e a grande quantidade de nomenclatura e classificações existentes sobre as mesmas, estimulou a realização de um simpósio sobre o tema que viesse a propor uma classificação internacional, o qual foi denominado *Classification of Large-Scale Flow-Transverse Bedforms/SEPM*. Nesse simpósio, ficou estabelecido que as grandes formas de leito subaquosas transversais seriam denominadas de Dunas Subaquosas com espaçamento e altura mínimos de 0,6 m e 0,075 m, respectivamente. As formas inferiores a estes valores são classificadas como *ripples* (Ashley, 1990).

Essa classificação leva em consideração três critérios hierárquicos: (1) Primeira ordem (necessário): tamanho e forma; (2) Segunda ordem (importante): superposição e características dos sedimentos; e (3) Terceira ordem (útil): perfil da forma, deposição da camada, estrutura de fluxo, intensidade relativa dos fluxos opostos e história do comportamento de migração das dunas. A tabela 5.2 apresenta a classificação proposta pelo SEPM Bedforms and Bedding Structures Research Symposium (Ashley, *op cit*).

Tabela 5.2. Classificação das grandes formas de leito subaquosas transversais recomendada pelo Simpósio SEPM Bedforms and Bedding Structures Research Symposium (Ashley, 1990).

DUNAS SUBAQUOSAS				
Primeira Ordem (necessários)				
Tamanho:	Pequena	Média	Grande	Muito grande
• Espaçamento	0,6 – 5,0 m	5,0 – 10,0 m	10,0 – 100,0 m	> 100,0 m
• Altura	0,075 – 0,4 m	0,4 – 0,75 m	0,75 – 5,0 m	> 5,0 m
Forma: 2-Dimensional (2-D) 3-Dimensional (3-D)				
Segunda Ordem (importantes)				
- Superposição: simples ou composta (tamanho e orientação relativa)				
- Características dos sedimentos: tamanho e selecionamento				
Terceira Ordem (útil)				
• Perfis da forma de leito (comprimentos e ângulos de inclinação do <i>stoss</i> e <i>lee</i>)				
• Deposição da camada (fração da camada coberta pelas formas de leito)				
• Estrutura do fluxo (características de tempo-velocidade)				
• Intensidade relativa dos fluxos opostos				
• História do comportamento de migração das dunas (acrecção vertical e horizontal)				

As formas de leito também são classificadas segundo o regime de fluxo, utilizando no Número de Froude [$F = U / (gD)^{1/2}$], onde: U é a velocidade da corrente (m/s), g é a aceleração da gravidade e D é a profundidade (m)]. Quando $F < 1$ as forças que agem no sistema são classificadas como de regime de fluxo inferior, capazes de formar *ripples* e dunas, por outro lado, quando $F > 1$, o regime é de fluxo superior capaz de gerar fundo plano e antidunas. Assim, as grandes formas de leito descritas em Ashley (1990) são todas de regime de fluxo inferior.

5.2.2 Formas de Leito no Sistema Pisa Sal

No estudo das formas de leito do sistema Pisa Sal (canais de marés do Pisa Sal, do Pisa Salzinho e do Volta do Sertão), foram utilizados sonogramas e observações diretas durante as baixa-mares de sizígia que expõem o leito dos canais. Foram coletados dados de comprimento de onda/espacamento (L), altura (H), descrições de estruturas sedimentares, amostragem de sedimentos, além de vasto acervo fotográfico.

O presente trabalho adotará a classificação das dunas subaquosas transversais proposta em Ashley (*op cit*). Foram identificadas 6 (seis) tipos de formas de leito no sistema Pisa Sal, onde dentre estas, 4 (quatro) foram identificadas nos sonogramas, 1 (uma) somente em campo e 1 (uma) no campo e sonograma, da seguinte maneira: fundo plano, marcas de ondas, dunas subaquosas transversais 2-D, dunas subaquosas transversais 3-D, superposição de formas de leito e rochoso, as quais serão caracterizadas a seguir.

As figuras 5.17 a 5.22 mostram sonogramas representativos das formas de leito e dos tipos de fundo que ocorrem no sistema Pisa Sal cujas localizações estão apresentadas na Figura 5.14. Padrões escuros são característicos de fundos de lamosos e rocha, enquanto padrões claros referem-se aos fundos de areia, cascalho ou mistura destes. Fundos de sedimentos areno lamosos apresentam um padrão homogêneo com mistura de pontos claros e escuros de tonalidade mais clara.

5.2.2.1 Fundo Plano

No sonograma, o fundo plano apresenta padrão homogêneo com forte reflexão cinza escuro. Este padrão ocorre próximo às margens, principalmente na porção marginal das barras em pontais de canais de marés e nas zonas de confluência de

canais (Figuras 5.20, 5.21 e 5.22), associados aos sedimentos lamosos das planícies de intermarés.

5.2.2.2 Marcas de Ondas

Mostram forte reflexão acústica, caracterizando-se por um padrão homogêneo de textura grossa que ocorrem em frente a desembocaduras dos canais de marés (Figuras 5.19, 5.20 e 5.22).

Nos sonogramas, é difícil determinar os seus comprimentos de onda, entretanto, dados de campo mostram que estas formas apresentam comprimentos de ondas e alturas, variando entre 0,06 a 0,58 m e 0,003 a 0,062 m, respectivamente (Figura 5.23), bem como o caráter assimétrico, ocorrendo sobrepostas às dunas subaquáticas, indicando o sentido do fluxo concordante com a corrente de maré de vazante (Figura 5.24).

5.2.2.3 Dunas Subaquosas Transversais 2-D

Apresentam forte padrão de reflexão acústica, mostrando cristas ligeiramente curvas e paralelas com orientação bem definida (Figuras 5.17 a 5.22). Localizam-se no centro dos canais e ocorrem ao longo de todo curso do Pisa Sal.

Estas formas de leito ocorrem em diferentes tamanhos: pequenas, médias e grandes, constituídas predominantemente por areia média, mostram passagem gradual entre elas e concentram-se na zona central do canal. Apresentam forma assimétrica com sentido do fluxo orientado segundo as correntes de marés de vazante. A tabela 5.3 mostra os valores dos comprimentos de ondas (L) e alturas (H) das dunas 2-D no sistema Pisa Sal. A figura 5.25 apresenta a classificação destas dunas segundo o Diagrama de Flemming (1988).

Tabela 5.3. Comprimentos (L) e alturas (H) das dunas subaquáticas transversais 2-D no sistema Pisa Sal. O comprimento foi determinado a partir dos sonogramas e a altura pela relação de Flemming (1988).

Classificação	L (m)	H (m)
2-D pequenas	1,21 – 4,93	0,13 – 0,40
2-D médias	5,10 – 9,40	0,41 – 0,74
2-D grandes	10,20 – 35,9	0,78 – 2,05

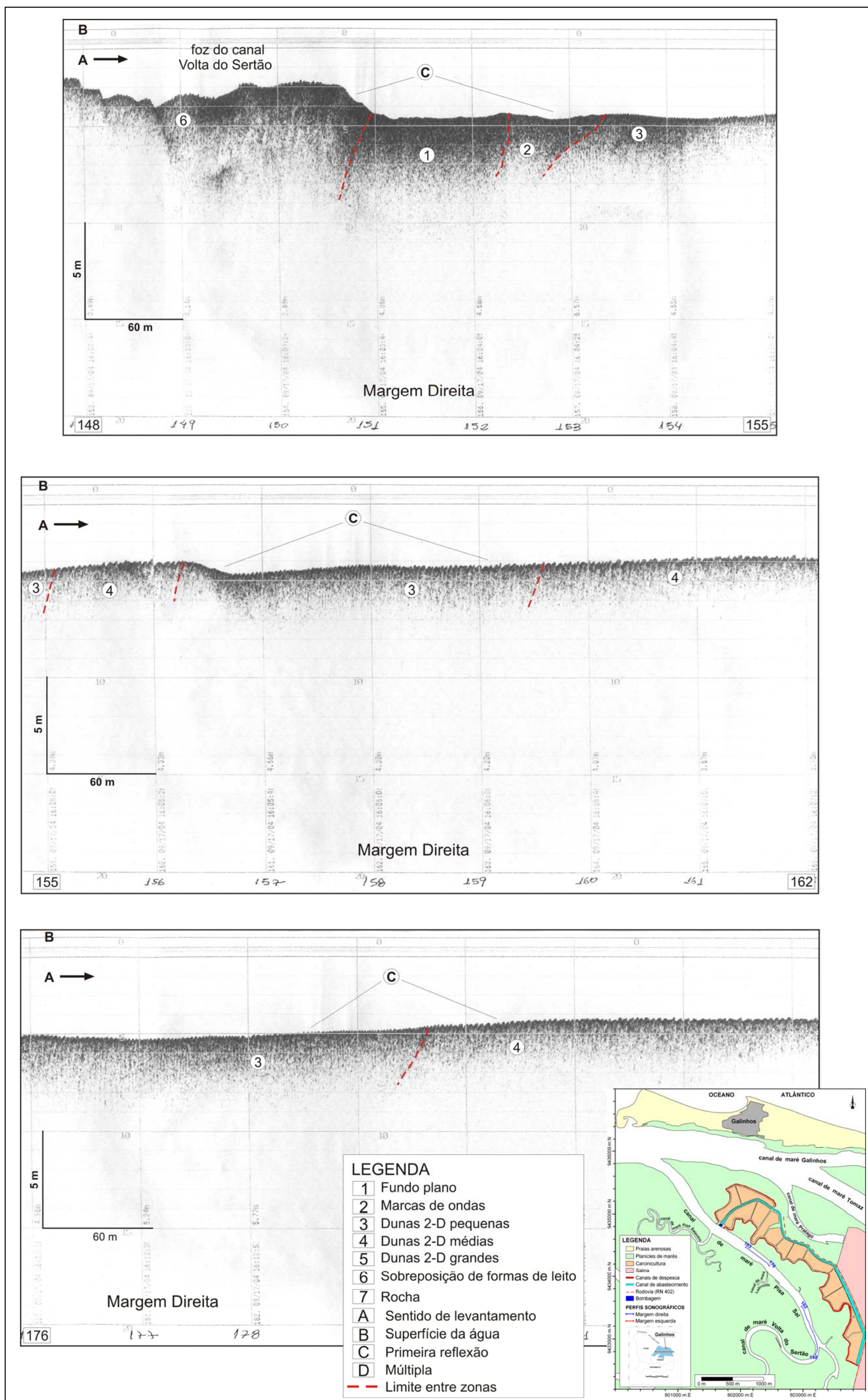


Figura 5.17. Sonogramas da margem direita do canal Pisa Sal mostrando a classificação das formas de leito nas posições 148 a 162 e 176 a 183.

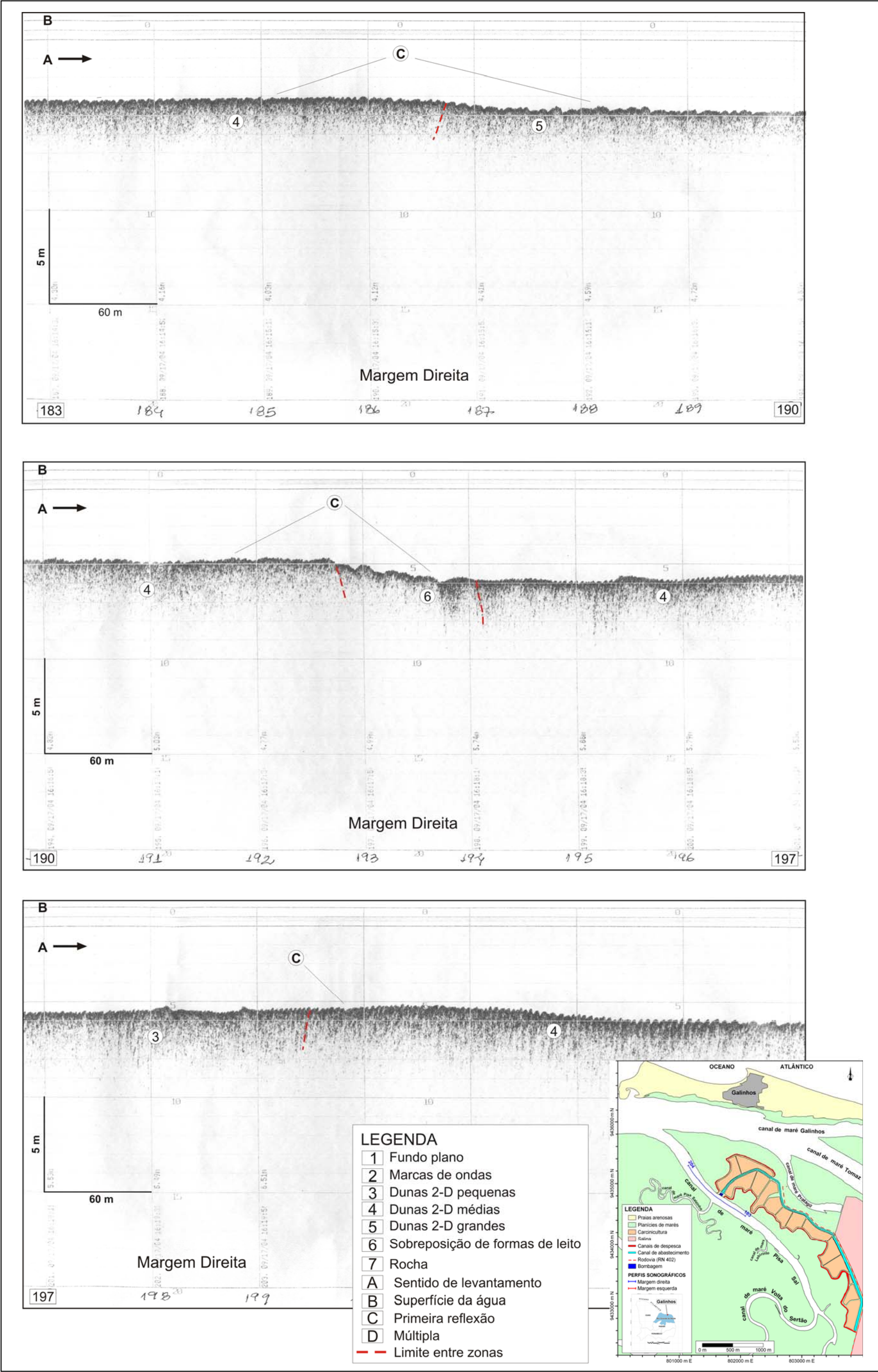


Figura 5.18. Sonogramas da margem direita do canal Pisa Sal mostrando a classificação das formas de leito nas posições 183 a 204.

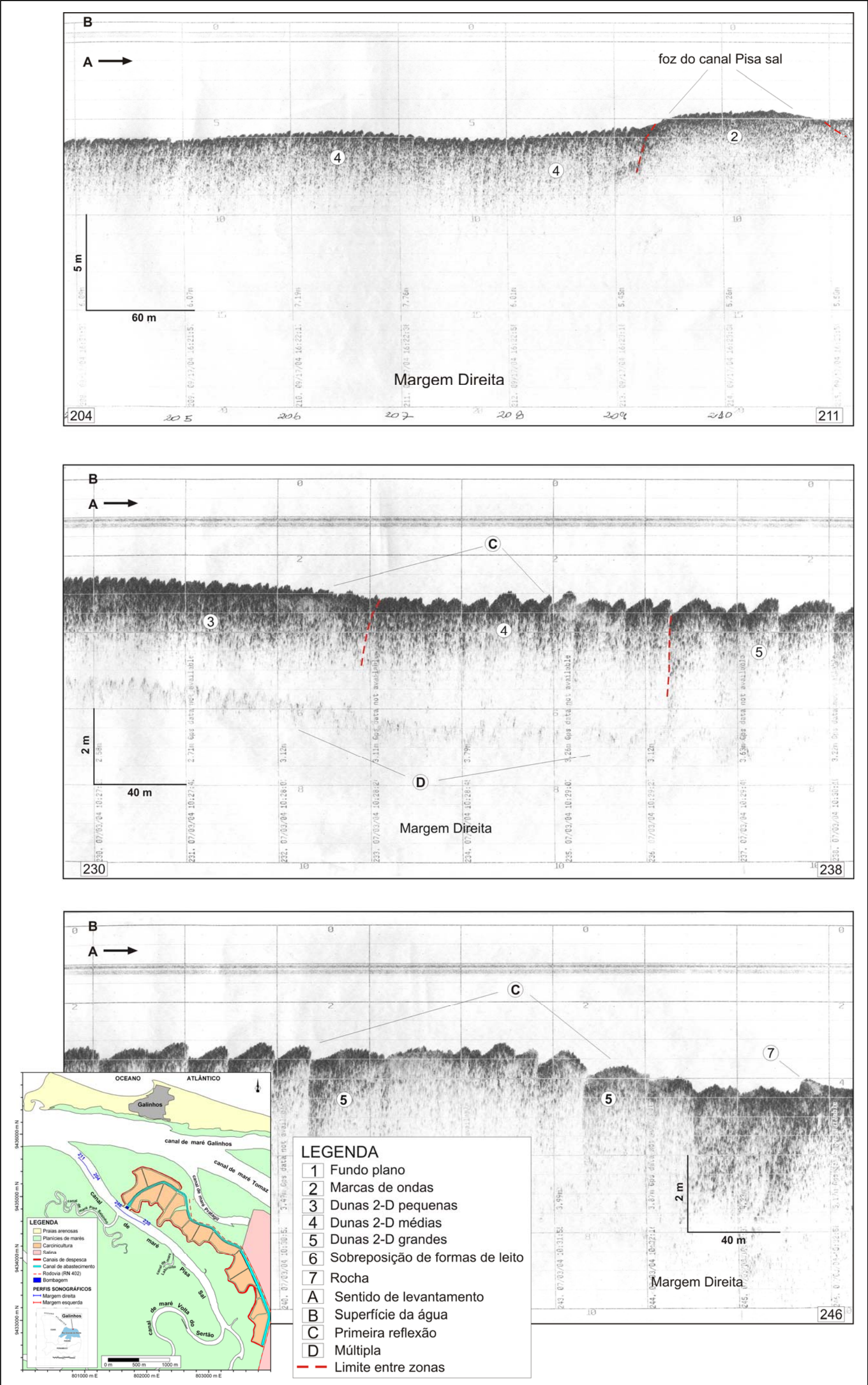


Figura 5.19. Sonogramas da margem direita do canal Pisa Sal mostrando a classificação das formas de leito nas posições 204 a 211 e 230 a 246.

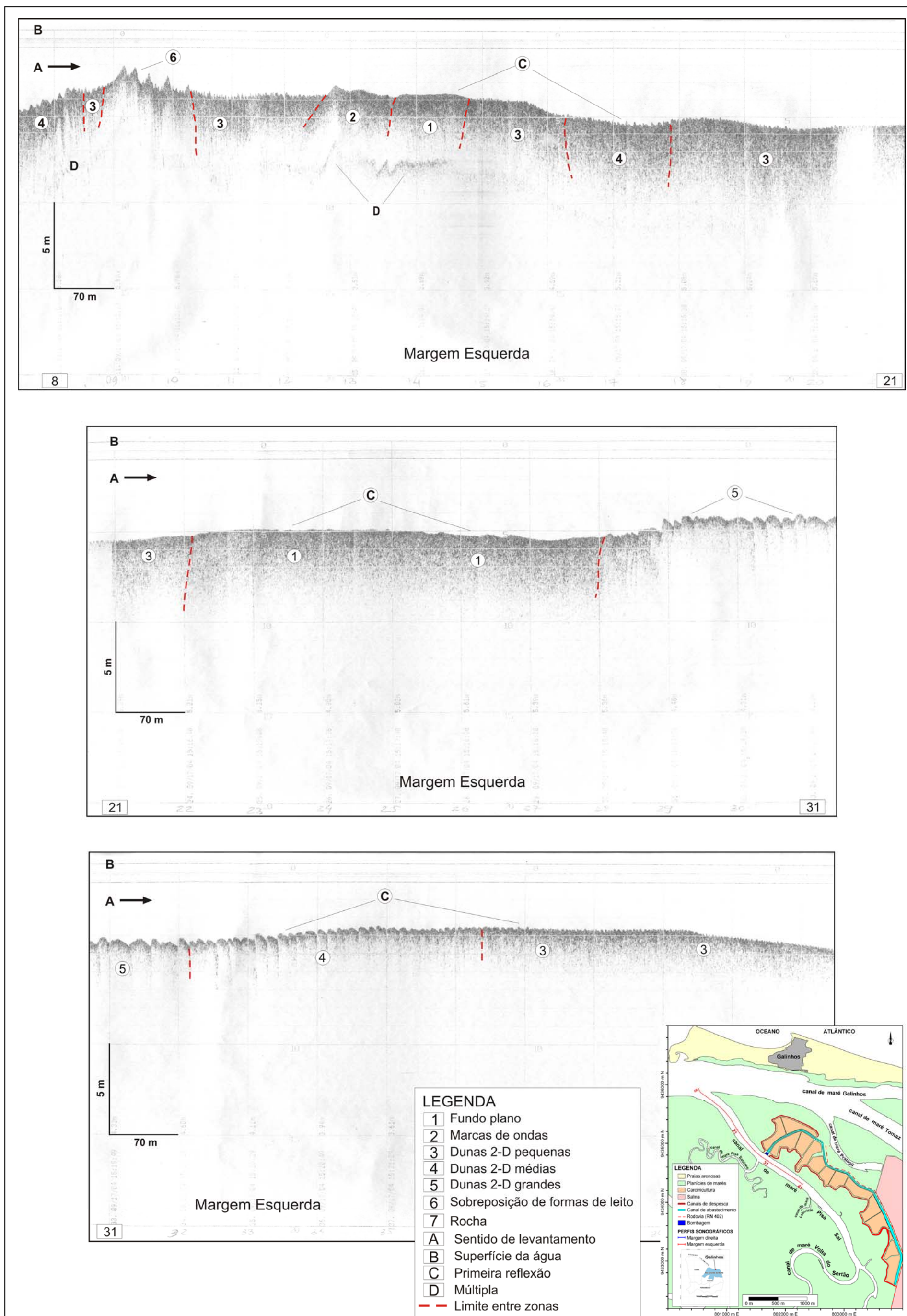


Figura 5.20. Sonogramas da margem esquerda do canal Pisa Sal mostrando a classificação das formas de leito nas posições 8 a 41.

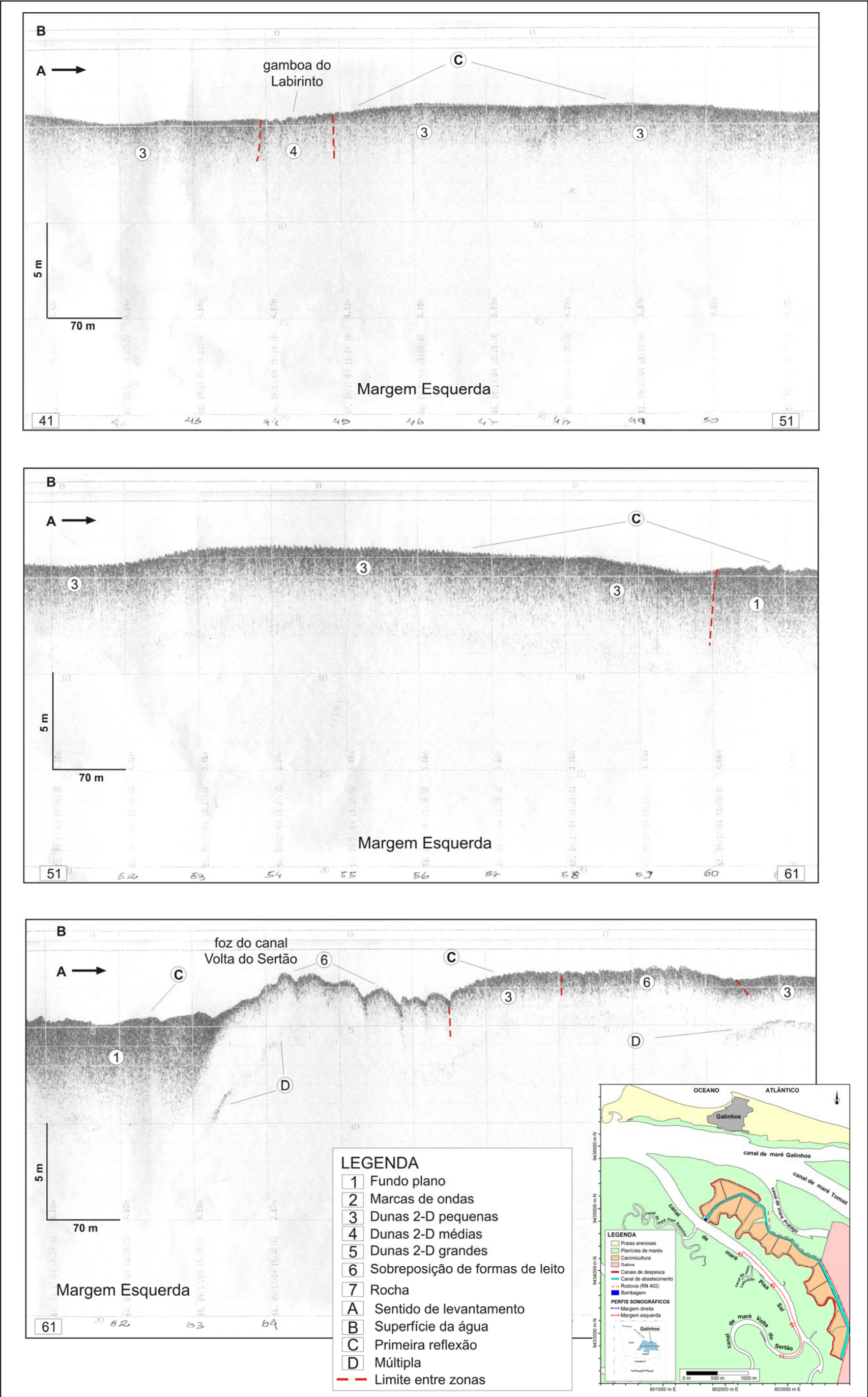


Figura 5.21. Sonogramas da margem esquerda do canal Pisa Sal e do canal Volta do Sertão mostrando a classificação das formas de leito nas posições 41 a 71.

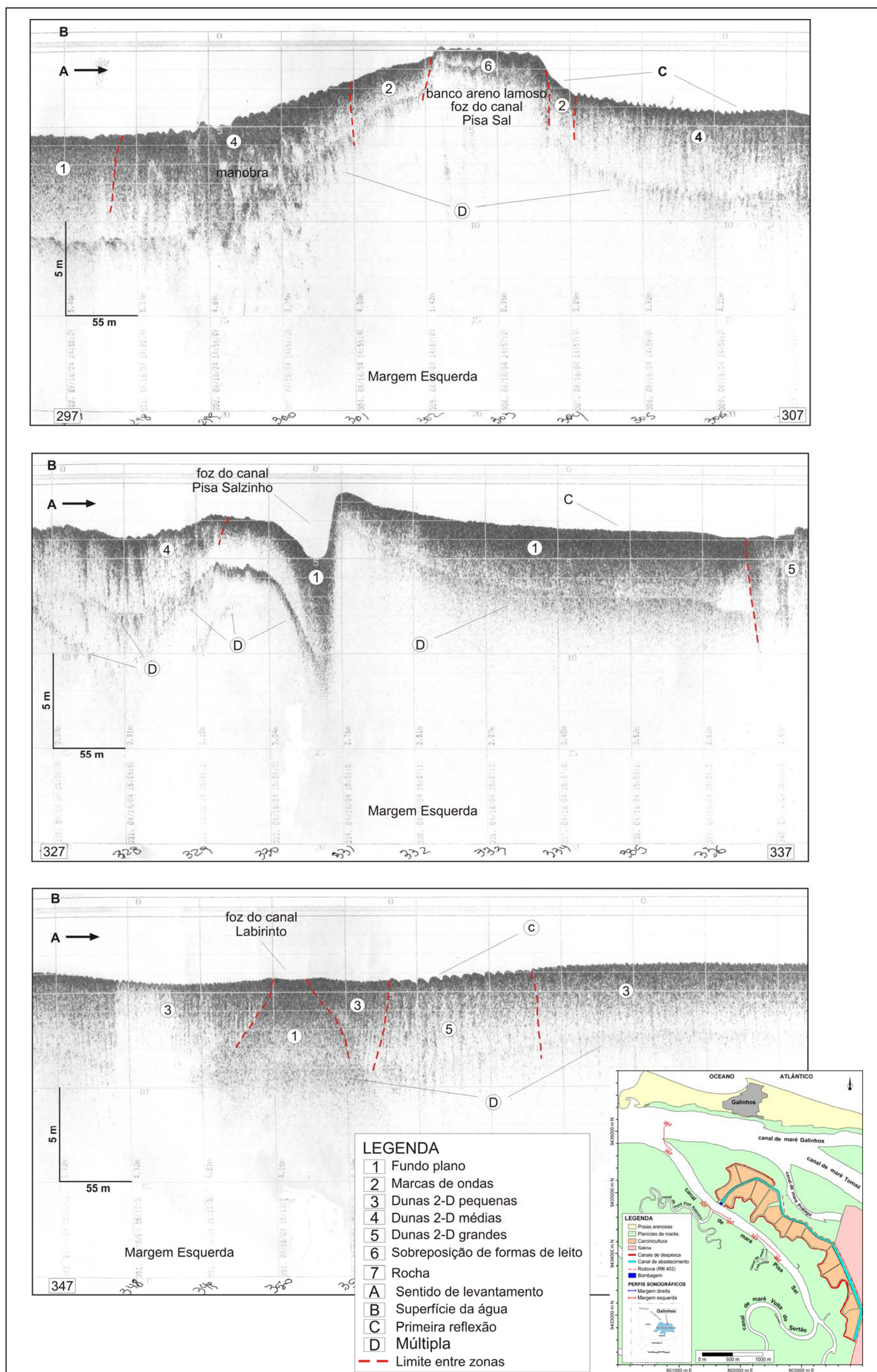


Figura 5.22. Sonogramas da margem esquerda do canal Pisa Sal mostrando a classificação das formas de leito nas posições 297 a 307, 327 a 337 e 347 a 357.

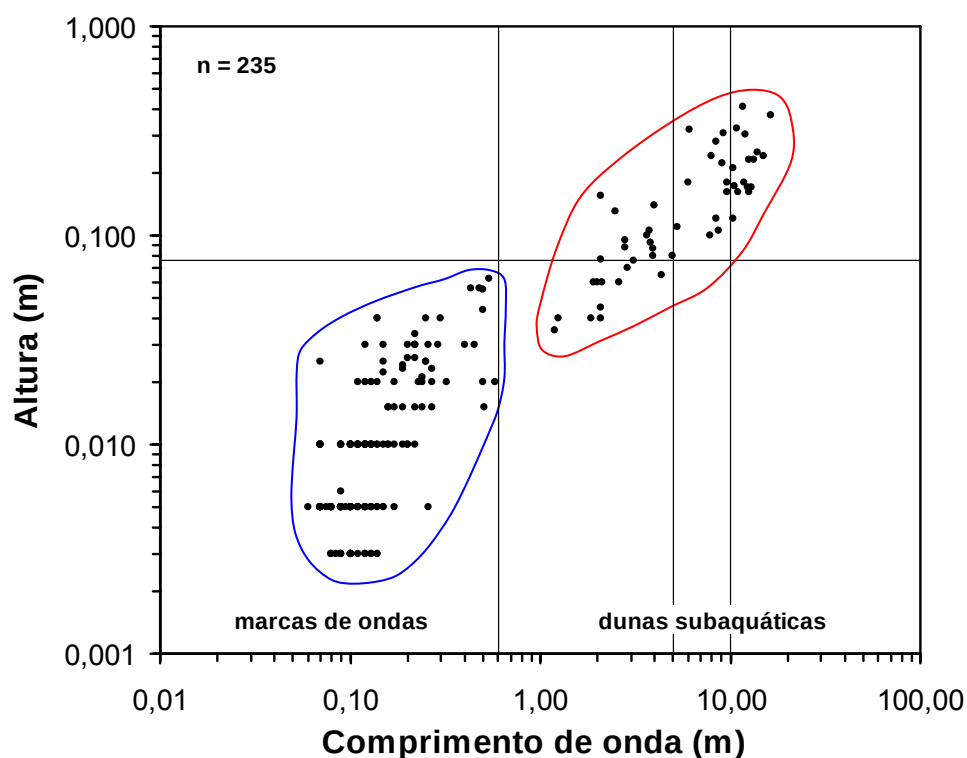


Figura 5.23. Diagrama de Flemming (1988) do log-log da altura (H) em relação ao comprimento (L) (dados de campo) de 235 formas de leito subaquáticas transversais ao fluxo dos canais do sistema Pisa Sal. As dunas subaquáticas transversais são do tipo 3-D e estão subdivididas segundo Ashley (1984).

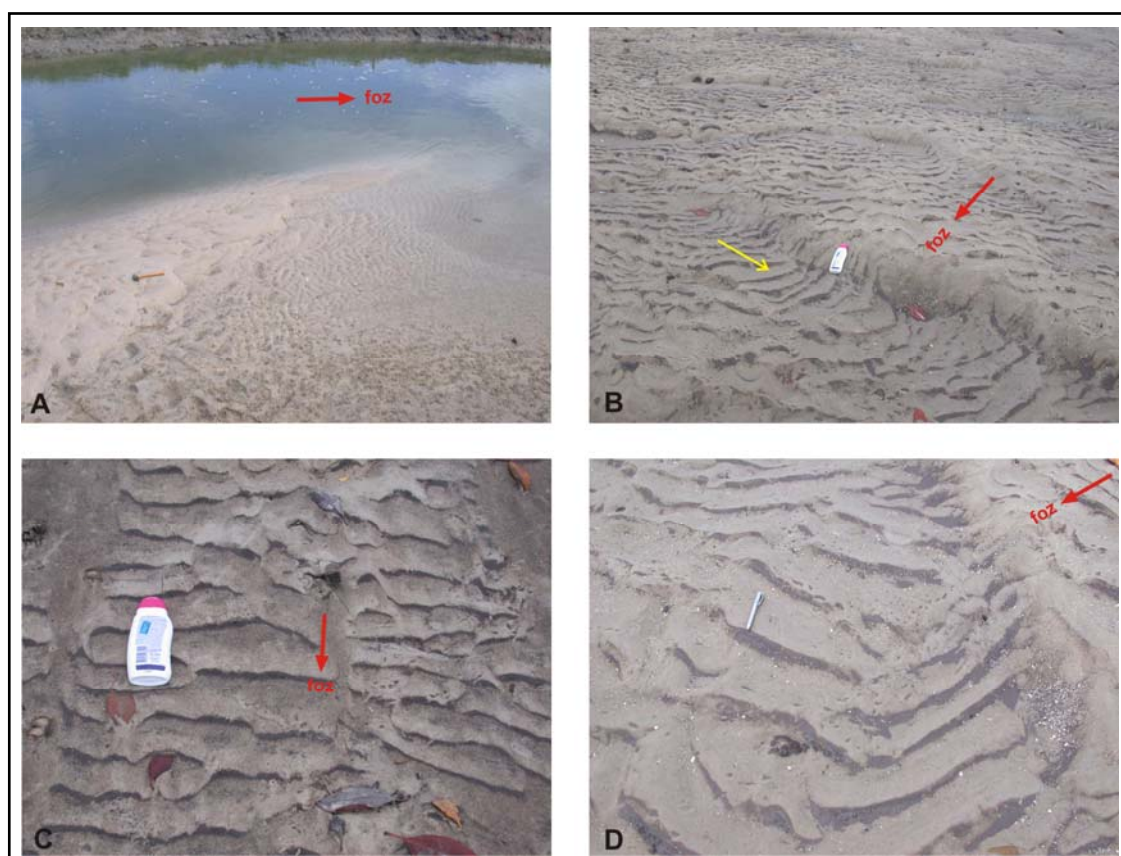


Figura 5.24. Marcas de ondas assimétricas, cristas retilíneas e curvas ocorrem isoladas ou sobrepostas a dunas pequenas 3-D com sentido do fluxo transversal ao fluxo principal (seta amarela) (B). Seta vermelha indica o sentido da vazante

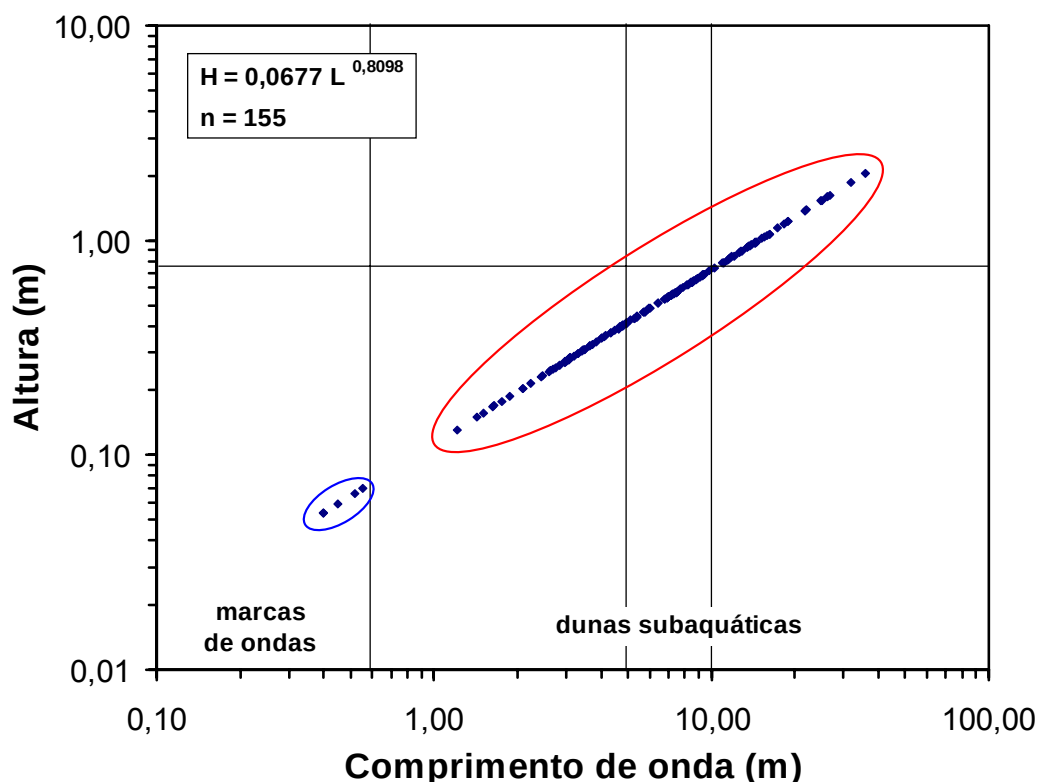


Figura 5.25. Diagrama de Flemming (1988) do log-log da altura (H) em relação ao comprimento (L) (sonogramas) de 155 formas de leito subaquáticas transversais ao fluxo dos canais do sistema Pisa Sal. A altura foi calculada segundo Flemming (1988). O campo das dunas subaquáticas está subdividido segundo Ashley (1984).

5.2.2.4 Dunas Subaquosas Transversais 3-D

Estas formas de leito foram identificadas somente em observações de campo durante as marés de vazante de sizígia que expõem as barras em pontais de canal de maré nos meandros do canal Volta do Sertão e Pisa Salzinho. Classificam-se segundo o tamanho em pequenas, médias e grandes (Tabela 5.4 e Figura 5.23), textura areia média, cristas curvilíneas assimétricas com sentido da corrente para vazante e marcas de ondas sobrepostas.

Tabela 5.4. Comprimentos de ondas (L) e alturas (H) das dunas subaquáticas transversais 3-D no sistema Pisa Sal. O comprimento de onda e a altura foram determinados a partir de medições de campo.

Classificação	L (m)	H (m)
3-D pequenas	1,20 – 4,95	0,04 – 0,16
3-D médias	5,98 – 9,70	0,10 – 0,32
3-D grandes	10,30 – 16,40	0,12 – 0,38

5.2.2.5 Superposição de Formas de Leito

Análise dos sonogramas e observações de campo permitiram identificar a superposição de formas de leito de diferentes tamanhos e orientações, classificada como superposição composta (Ashley, 1990), dentre as quais, destacam-se: (a) Dunas Subaquosas Pequenas 2-D sobre Dunas Subaquosas Grandes 2-D (Figuras 5.17, 5.18 e 5.21), (b) Marcas de Ondas sobre Dunas Subaquosas Grandes 2-D (Figuras 5.17, 5.18 e 5.21) e (c) Marcas de Ondas sobre Dunas Subaquosas Pequenas a Grandes 3-D (Figuras 5.24b, 5.24c, 5.24d e 5.26).

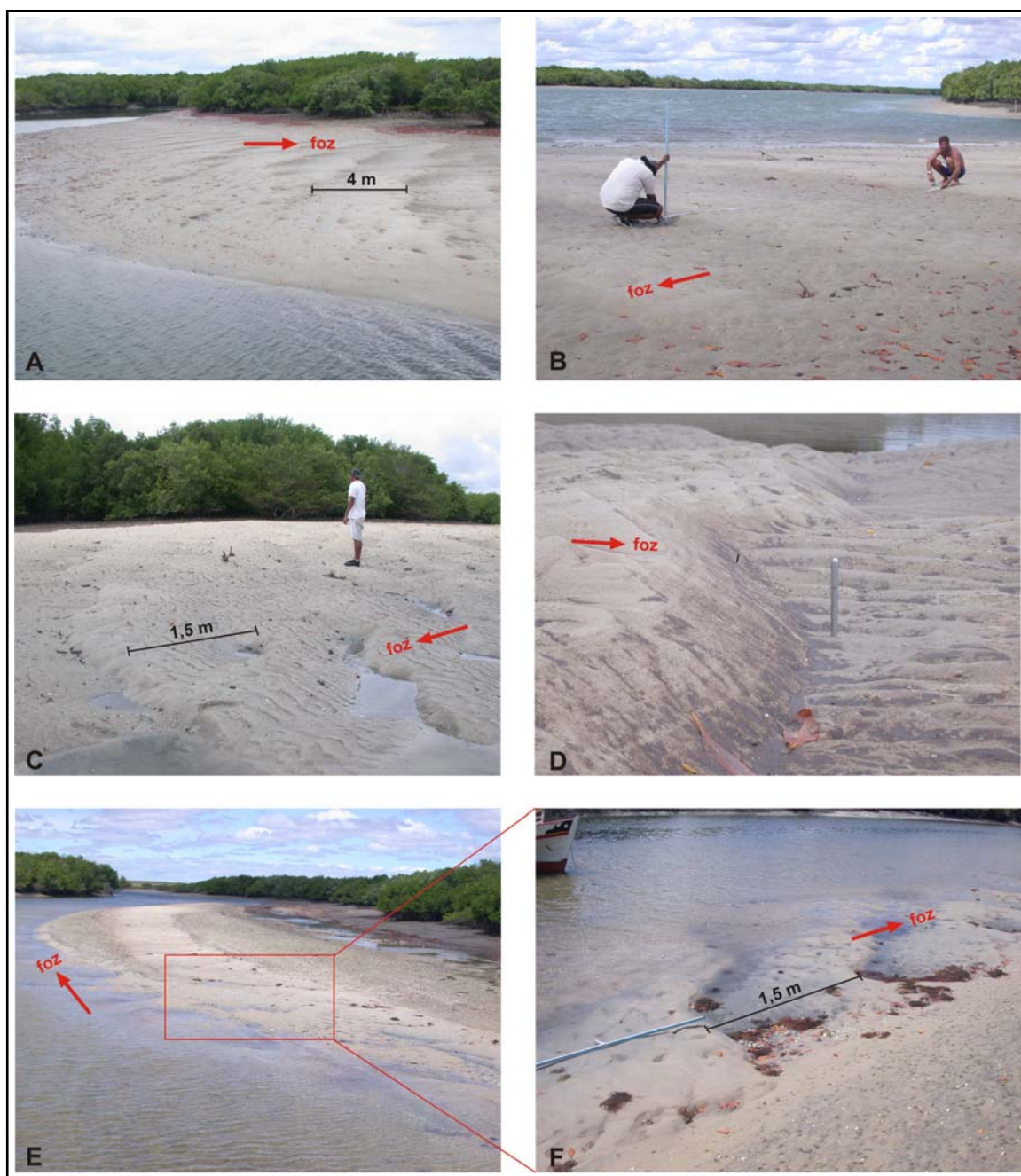


Figura 5.26. Dunas subaquáticas pequenas 3-D localizadas na foz do canal Pisa Salzinho (A e B), no interior do canal Pisa Salzinho (C e D) e no canal Volta do Sertão (E e F). Setas vermelhas indicam o sentido da maré vazante.

Os grupos a e b foram identificados nos sonogramas e mostram forte padrão de reflexão homogêneo com alinhamento paralelo às cristas das dunas grandes 2-D bem definidos. As dunas pequenas 2-D mostram fácil identificação das suas cristas, entretanto não mostram sua orientação preferencial. Ocorrem na porção central dos canais e nas zonas de encontro de canais, tais como: canal Pisa Sal com canal Volta do Sertão e canal Pisa Sal com o Pisa Salzinho. Apresentam-se assimétricas, mostrando sentido do fluxo concordante com as correntes de marés de vazante.

5.2.2.6 Rochoso

No sonograma esta feição apresenta forte reflexão homogênea maciça que destoa do padrão adjacente das dunas grandes 2-D. Mostra forma pontiaguda arredondada com inclinação contrária ao sentido da corrente das dunas 2-D. A única feição representativa desse padrão ocorre no centro do canal Pisa Sal logo após a bombagem da empresa Camarus e da foz do canal Pisa Salzinho (Figura 5.19).

5.3 DISCUSSÕES

O sistema Pisa Sal é representado por canais de marés de pequenas dimensões, onde o canal principal apresenta baixa profundidade (máximo de -4,23 m) as quais estão associadas às zonas de confluência com outros canais. A morfologia dos perfis transversais em forma de “V”, à montante, favorece a concentração local da componente longitudinal da velocidade após a confluência entre o canal Volta do Sertão e o Pisa Sal que evolui para a forma em “U” canal abaixo.

A baixa profundidade do canal e o baixo gradiente são características que sustentam a existência de um importante processo de deposição canal abaixo, que culmina com a formação de uma soleira sedimentar na sua desembocadura com profundidade máxima reduzida para -1,9 m. A formação desta soleira (banco areno lamoso) está associada ao desaceleramento das correntes de vazante do Pisa Sal pelas correntes mais fortes do canal de Galinhos, dificultando o transporte de sedimentos para o seu interior, ao mesmo tempo em que ocorre *by pass* de sedimentos em direção ao canal (*inlet*) que conecta o complexo estuarino lagunar Galinhos-Guamaré ao ambiente marinho.

Os bancos areno lamosos com superposição de formas de leito de menores dimensões formados nos canais meandantes Volta do Sertão e Pisa Salzinho

apresentam as mesmas características das feições “formas de canal” (*channel forms*), descritas por Ashley (1990) para o ambiente fluvial, que são periódicas e de maiores dimensões que as formas de leito do próprio canal. Estes bancos são correlacionados ao ambiente de barra de pontal (*point bar*) e constituem plataformas para migração de formas de leito menores, tais como dunas e marcas de ondas (Ashley, 1978, Bridge, 1985 e Ashley, 1990), entretanto o agente dinâmico são as correntes de marés, classificando-os assim, como depósitos de barras em pontais de canais de marés. Segundo Reading (1993) canais de marés que penetram em planícies de marés comumente apresentam alta sinuosidade e formam barras em pontais na sua margem convexa.

Por outro lado, os bancos lamosos da margem esquerda do canal principal são formados em condições de intermaré por acreção vertical e migração lateral em direção ao seu centro.

Os bancos areno lamosos e os canais esculpidos no leito do Pisa Sal em frente a desembocadura dos canais de despesca da Camarus são formados pelas correntes de vazante mais fortes dos CDs que penetram na margem direita do canal Pisa Sal, constituindo um obstáculo para suas correntes mais fracas, semelhante ao mecanismo de “molhe hidráulico” ou “espigão hidráulico” (*hydraulic jetties*) (Figura 5.27) descrito por Suguio *et al.* (1985b) e Martin e Dominguez (1994) que neste trabalho é denominado de molhe hidráulico de maré (*tidal hydraulic jetties*).

Mecanismo semelhante, a partir de um jato de maré vazante (*ebb jet outflow*) foi descrito por Caldas (2002) para explicar o transporte de sedimentos costeiros para Oeste em frente ao pontal (*spit*) de Galinhos, bem como o impedimento da sua migração nesta direção.

Na margem direita, à jusante do CD1, ocorre erosão causada pelo efeito “molhe hidráulico de maré”, bem como pelo bombeamento da água para abastecer os viveiros da Camarus. Na área em frente à casa de bombas (bombagem), as isobatimétricas mostram deflexão acentuada na sua direção (Figura 5.27A), o que indica aumento de profundidade em direção à margem. A variação da amplitude da maré medida com bóia S4 em frente à estação de bombeamento determinou um rebaixamento da linha d'água durante a estufa de enchente - momento do bombeamento -, entre 0,25 a 0,30 m. Portanto, o mecanismo de bombeamento da água provoca ressuspensão dos sedimentos de fundo e incrementa o processo

erosivo. No Capítulo 7 - Correntes e Propriedades Termohalinas do Sistema Pisa Sal consta a discussão sobre o rebaixamento da linha d'água durante o bombeamento.

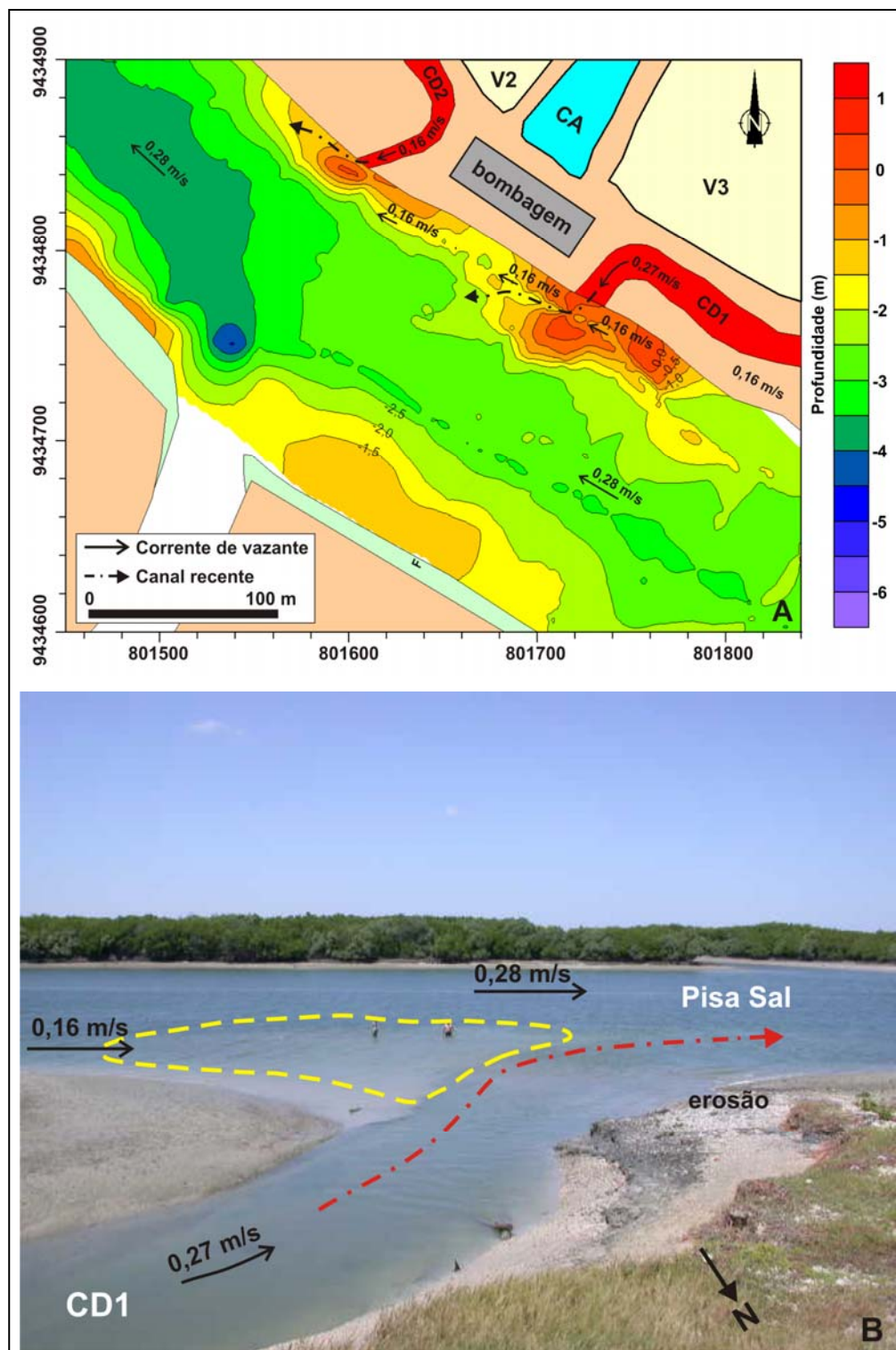


Figura 5.27. Extrato do mapa batimétrico mostrando os canais recentes esculpidos pelos CDs (linha traço-ponto preta) e os bancos definidos pela batimetria (A); foto da desembocadura do CD1 com o canal recente (linha traço-ponto vermelha) esculpido no leito do Pisa Sal, banco areno lamoso (linha tracejada amarela) formado pelo mecanismo de molhe hidráulico de maré, a pluma de sedimentos em suspensão mostrando deflexão em direção ao centro do Pisa Sal e erosão na margem oposta ao banco) (B).

Portanto, condições de deposição ocorrem nas barras em pontais de canais de marés, bancos marginais e desembocaduras dos canais (naturais ou escavados), enquanto condições erosivas associam-se às margens côncavas dos canais meandrantos, independente do seu grau de sinuosidade, e nas confluências de canais de marés ou canais escavados da carcinicultura.

As dunas subaquosas 2D de pequeno, médio e grande comprimento, (Ashley, 1990), assimétricas, vergência para vazante ocorrem no leito do canal Pisa Sal associadas a variação da profundidade, ao tamanho do grão e a velocidade da corrente. Nesse sentido, a assimetria de duração e de velocidade das correntes permite que estas dunas não sejam destruídas, nem revertam sua vergência no sentido da maré enchente. Entretanto, as marcas de ondas que ocorrem sobrepostas podem ser destruídas e/ou inverter a sua direção de fluxo.

Por sua vez, as dunas subaquosas 3D ocorrem na porção distal das barras em pontais de canais de marés, onde as velocidades das correntes e a profundidade aumentam. Robër et al. (2005) também indicam a presença de *megaripples* assimétricas com crista reta, textura areia média (0,35 mm), comprimentos < 0,5 m; 0,5 a 1,0 m e > 2,5 m e sentido de fluxo para vazante na calha do canal de Galinhos, entre a cidade homônima e o distrito de Galos, as quais são correlacionadas as dunas 2D existentes no sistema Pisa Sal. A relação entre as formas de leito e a velocidade das correntes será discutida no Capítulo 9 - Transporte de Sedimentos no Sistema Pisa Sal.

Superposição de formas reflete a complexidade de condições, em vez de indicar os processos responsáveis por sua formação (Ashley, 1990). Assim, alguns fatores favorecem a formação e/ou destruição de formas de leito de pequeno comprimento (dunas e marcas de ondas) sobrepostas as dunas subaquosas, como as variações na velocidade das correntes, a assimetria da maré e a granulometria dos sedimentos.

6 CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA E TEXTURAL DO SISTEMA PISA SAL

Neste capítulo, estão apresentadas as classificações faciológica e textural dos sedimentos de fundo do sistema Pisa Sal, nas quais estão incluídos o canal Volta do Sertão e o canal Pisa Salzinho, além dos canais de pesca (CDs) da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda., bem como a descrição dos trabalhos de campo, laboratório e gabinete que permitiram determinar esta classificação. Optou-se por fazer a classificação do Pisa Sal (sistema natural) em separado dos canais de pesca da carcinicultura (construídos pelo homem ou canais artificiais), uma vez que mostram características e origens distintas.

Também constam, neste capítulo, a caracterização dos parâmetros estatísticos e das fontes e sumidouros de sedimentos, assim como, ao final, uma discussão geral sobre o conteúdo apresentado.

6.1 AMOSTRAGEM DE SEDIMENTOS DE FUNDO

Foram utilizadas 49 amostras de sedimentos de fundo para caracterização faciológica dos canais do sistema Pisa Sal, as quais estão distribuídas da seguinte forma: 28 amostras coletadas durante a elaboração do EIA-RIMA da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda. (Camarus, 2003); 19 amostras coletadas durante a execução deste trabalho e 2 amostras de Dibbern (2007). Também foram coletadas 74 amostras de sedimentos de fundo nos CDs, das quais 38 no verão (dezembro 2005) e 36 no inverno (junho de 2006) nos 7 perfis do monitoramento topográfico (Figura 6.1).

A amostragem nos canais do sistema Pisa Sal e nos CDs foi executada transversalmente aos canais (margens e centro) com um volume de sedimentos de aproximadamente 500 g. No sistema Pisa Sal, a amostragem ocorreu através de mergulho autônomo e draga Gibbs, enquanto, nos CDs, foi utilizado um amostrador de PVC, uma vez que a coleta foi realizada durante a baixa-mar que expõe totalmente o fundo, permitindo o acesso até o ponto desejado. O posicionamento das amostras no Pisa Sal foi realizado pelo sistema DGPS, enquanto que, nos CDs, foram posicionadas com estação total durante o monitoramento.

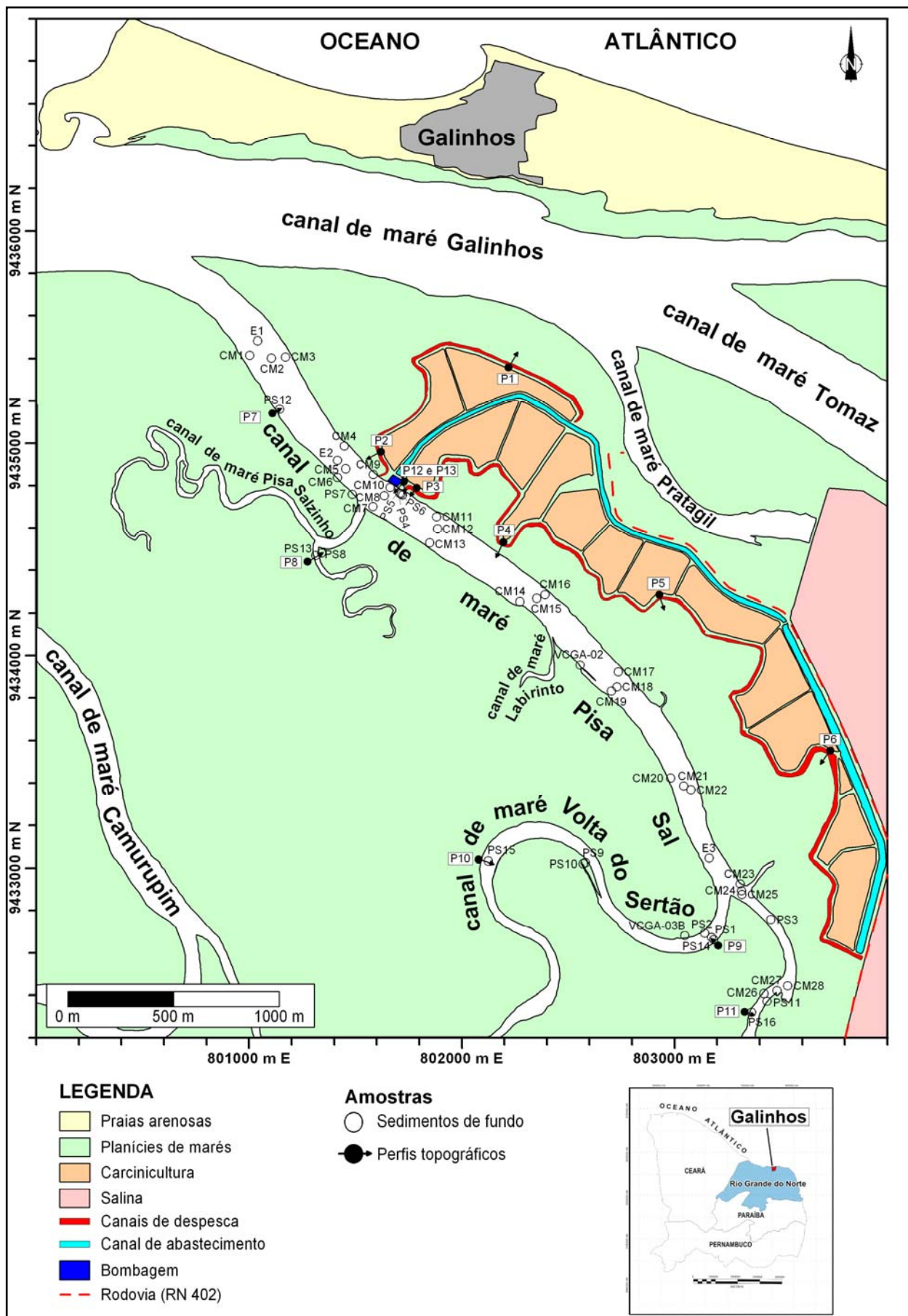


Figura 6.1. Localização das amostras de sedimentos de fundo e dos perfis topográficos no sistema Pisa Sal, Galinhos/RN.

6.2 PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

As amostras foram analisadas quanto à granulometria ao teor de carbonato e de matéria orgânica. Inicialmente, as amostras foram submetidas a sucessivas lavagens com água destilada para eliminação de sais, para não causar interferência na análise granulométrica. Em seguida, o material foi levado à estufa a 60°C até a secagem completa. Após a secagem, cada amostra foi homogeneizada e quarteada de onde foi separada uma fração de 100 g que passou na peneira de 2,0 mm, sendo, em seguida, pesada.

A fração menor que 2 mm foi atacada com ácido clorídrico (HCl 10%) para eliminar totalmente o carbonato, sendo o resíduo restante lavado com água destilada para eliminação do ácido clorídrico. Em seguida, foram pesados e calculados os percentuais de carbonato por diferença de peso.

Na sequência, 10g da amostra livre de carbonato foi atacada com peróxido de hidrogênio (H₂O₂) 120 v, diluído em água destilada (100ml H₂O₂ para 900ml de água destilada) com a finalidade de eliminar toda a matéria orgânica. Em seguida, as amostras foram colocadas em uma bateria de funis com papel de filtro e lavadas com água destilada para eliminação do peróxido de hidrogênio. Os filtros contendo o material foram levados à estufa para secagem a uma temperatura máxima de 60°C, pesados e calculados o percentual de matéria orgânica por diferença de peso.

Nas amostras da Camarus (2003), o volume total (100 g) foi separado por peneiramento em intervalo de 1 phi nas frações 2,0; 1,0; 0,5; 0,250; 0,125 e 0,063 mm. As frações inferiores a 0,063 mm foram separadas pelo método da pipetagem nas frações: 0,03; 0,015; 0,0075; 0,0004 e 0,0002 mm.

Nas demais amostras, a fração menor que 2 mm livre de carbonato e matéria orgânica passou por separação granulométrica em um granulômetro a laser, modelo 1180L da CILAS, com intervalo de análise de ½ phi, abrangendo um espectro de 2,0 mm a 0,25 µm. Os dados de frequência simples (%) da fração retida das amostras estão apresentados no Apêndice 6.1. O Apêndice 6.2 apresenta os percentuais de cascalho, areia, lama, areia+lama, carbonato e matéria orgânica nas amostras de fundo, enquanto no Apêndice 6.3 constam os parâmetros estatísticos e a classificação faciológica segundo Vital *et al.* (2005).

As amostras do canal do Pisa sal e as dos CDs (campanha de inverno) foram submetidas a uma descrição mineralógica e grau de arredondamento.

6.3 TRABALHOS DE GABINETE

Os dados das amostras de sedimentos de fundo foram processados estatisticamente no *software* SAG (Sistema de Análise Granulométrica) desenvolvido pelo LAGEMAR/UFF, que fornece parâmetros estatísticos das amostras segundo Folk e Ward (1957): média, mediana, selecionamento, assimetria e curtose (Apêndice 6.2), além de classificá-las texturalmente segundo a média, Folk (1974), Larssonneur (1977) e Dias (1996). Neste trabalho, as amostras foram classificadas texturalmente, segundo o diâmetro médio.

A classificação faciológica adotada segue a proposta de Vital *et al.* (2005) que foi adaptada de Freire *et al.* (1997, modificada de Dias, 1996). A classificação de Freire *et al.* (*op cit.*) possui 16 classes que são definidas segundo o percentual das frações cascalho, areia e lama, além do teor de carbonato. Vital *et al.* (*op cit.*) propõem a substituição do termo litoclástico pelo termo siliciclástico (Tabela 6.1) devido ao primeiro ser utilizado para conceituar um clasto sedimentar cuja constituição refere-se a uma rocha pré-existente (Allaby e Allaby, 1991 *apud* Vital *et al.*, *op cit.*). O termo siliciclástico aplica-se melhor às coberturas sedimentares da plataforma continental e aos ambientes transicionais do Nordeste do Brasil, pois estes referem-se a sedimentos constituídos por fragmentos de rochas e minerais silicáticos.

Tabela 6.1. Classificação de sedimentos do fundo marinho de acordo com Vital *et al.* (2005, modificado de Freire *et al.*, 1997).

SUBDIVISÕES PRINCIPAIS	SEIXOS, GRÂNULOS, COQUINAS OU RODOLITOS (L<15%) (Md>2mm)	AREIAS (L<15%); (A+L>50%) (Md<2mm)		SEDIMENTOS LAMOSOS (L>15%)
		15%<superior a 2mm<50%	superior a 2mm<15%	
SEDIMENTO SILICICLÁSTICO carbonatos <30%	CS 1 cascalho siliciclástico	AS1a areia siliciclástica c/ grn e casc	AS1b areia siliciclástica	LL1 lama terrígena
SEDIMENTO LITO- BIOCLÁSTICO carbonato= 30 a 50%	CS 2 cascalho silici-bioclástico	AS2a areia silici-bioclástica c/ grn e casc	AS2b Areia silici- bioclástica	LL2 marga arenosa
SEDIMENTO BIO- SILICICLÁSTICO carbonatos= 50 a 70%	CB1 cascalho bio-siliciclástico	AB1a areia bio-siliciclástica c/ grn e casc	AB1b areia bio- siliciclástica	LB 1 marga calcárea
SEDIMENTO BIOCLÁSTICO carbonato >70%	CB2 cascalho bioclástico	AB2a areia bioclástica c/ grn e casc	AB2b areia bioclástica	LB2 lama calcárea

Abreviaturas: A = areia; L = lama; Md = mediana, grn = grânulo, casc = cascalho

6.4 CARACTERIZAÇÃO TEXTURAL E FACIOLÓGICA

Neste sub-capítulo, será apresentada a caracterização textural e faciológica do sistema Pisa Sal e dos canais artificiais (CDs) da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda.

6.4.1 Sistema Pisa Sal

6.4.1.1 Textura dos Sedimentos e Parâmetros Estatísticos

Os sedimentos de fundo do sistema Pisa Sal estão agrupados segundo o diâmetro médio em 6 (seis) classes texturais, a saber: Areia muito grossa (Ar mgr), Areia grossa (Ar gr), Areia média (Ar md), Areia fina (Ar fn), Areia muito fina (Ar mfn) e Silte (St) (Figura 6.2), mostrando um largo espectro com valores entre 1,027 e 0,006 mm (areia muito grossa a silte muito fino). O diâmetro médio reflete a média geral do tamanho dos sedimentos, sendo um importante parâmetro que permite relacioná-lo às características do material fonte, à energia da corrente e aos processos de deposição.

De uma forma geral, os sedimentos mostram predominância da fração areia em relação à fração lamosa (Figura 6.3). No centro dos canais ocorrem exclusivamente as classes arenosas mais grossas, tais como: Areia muito grossa, areia grossa, areia média e areia fina. Somente duas amostras localizadas na E2 e E3, apresentam textura areia muito grossa, refletindo a alta energia das correntes de marés no centro dos canais. Por outro lado, as classes mais finas, como areia muito fina e silte ocorrem próximas às margens, principalmente nas zonas de ocorrência de bancos arenosos (CM6, CM14 e CM28) e lamosos (VCGA-02 e VCGA-03B) (Figura 6.2), refletindo a baixa energia das correntes nestas zonas.

A distribuição das classes texturais nas margens do canal do Pisa Sal, mostra características distintas: na margem esquerda, entre o encontro com Volta do Sertão até em frente à bombagem da Camarus e boca do Pisa Salzinho, trecho onde ocorre a formação de bancos arenosos e lamosos, predominam areia muito fina e silte, enquanto, no mesmo trecho da margem direita, predominam areia média e areia fina. No trecho entre a bombagem da Camarus e a boca do canal Pisa Sal ocorre o inverso, na margem esquerda predomina areia média, enquanto, na margem direita, areia muito fina (Figura 6.2).

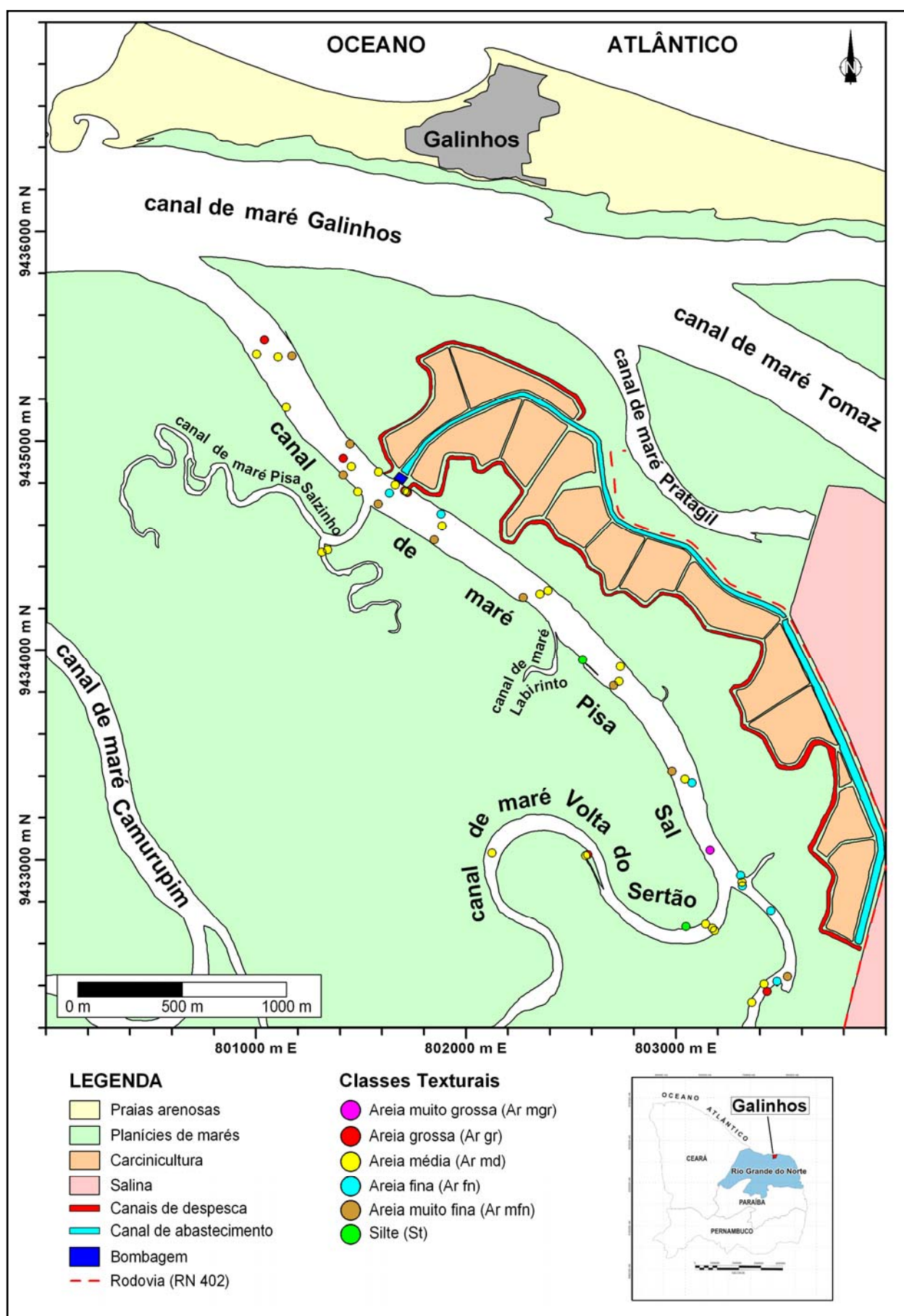


Figura 6.2. Classes texturais dos sedimentos de fundo do sistema Pisa Sal, Galinhos/RN com base no diâmetro médio.

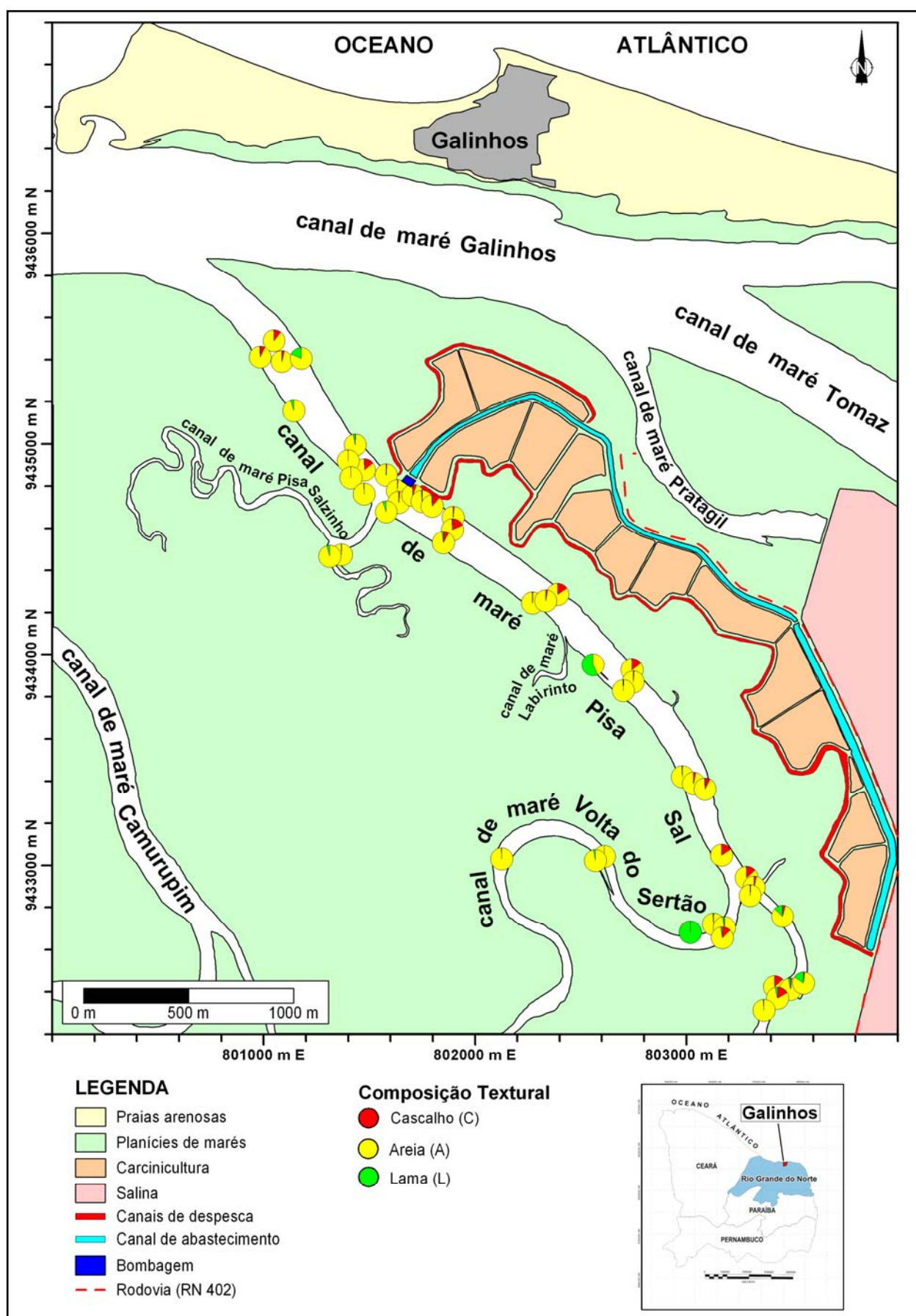


Figura 6.3. Conteúdo de cascalho, areia e lama nos sedimentos de fundo do sistema Pisa Sal, Galinhos/RN.

No centro do canal Volta do Sertão, predominam as classes areia média e areia grossa. Nas margens, principalmente nas barras em pontais que se formam em seus meandros, as fácies texturais são distintas: no banco lamoso, próximo ao encontro com o Pisa Sal, ocorre silte fino, enquanto o banco mais à montante é constituído por areia grossa e areia média (Figura 6.2). No canal e nas barras em pontais do Pisa Salzinho, predominam areia média (Figura 6.2).

O selecionamento de uma amostra é definido pelo grau de dispersão (desvio padrão) dos tamanhos das partículas em torno do valor médio, estando associado à energia que as correntes possuem para selecionar uma determinada classe granulométrica (Folk e Ward, 1957). Assim, de uma forma geral, os sedimentos do sistema Pisa Sal apresentam selecionamento variando de muito bem selecionado a muito pobremente selecionado, com valores de 0,342 a 2,009 phi (Figura 6.4). Apenas uma amostra da classe areia fina (CM7) apresenta-se muito bem selecionada (0,342 phi), como também apenas uma amostra da classe areia média (CM12) apresenta-se muito pobremente selecionada (2,009 phi). As classes mais grossas apresentam um grande espectro de variação textural, ao passo que a classe silte apresenta, exclusivamente, um grau de seleção pobre (1,037 a 1,44 phi) (Figura 6.4). Comparando as classes que ocorrem no centro do canal em relação às margens e as barras de meandros, nota-se que os sedimentos são bem e moderadamente bem selecionados.

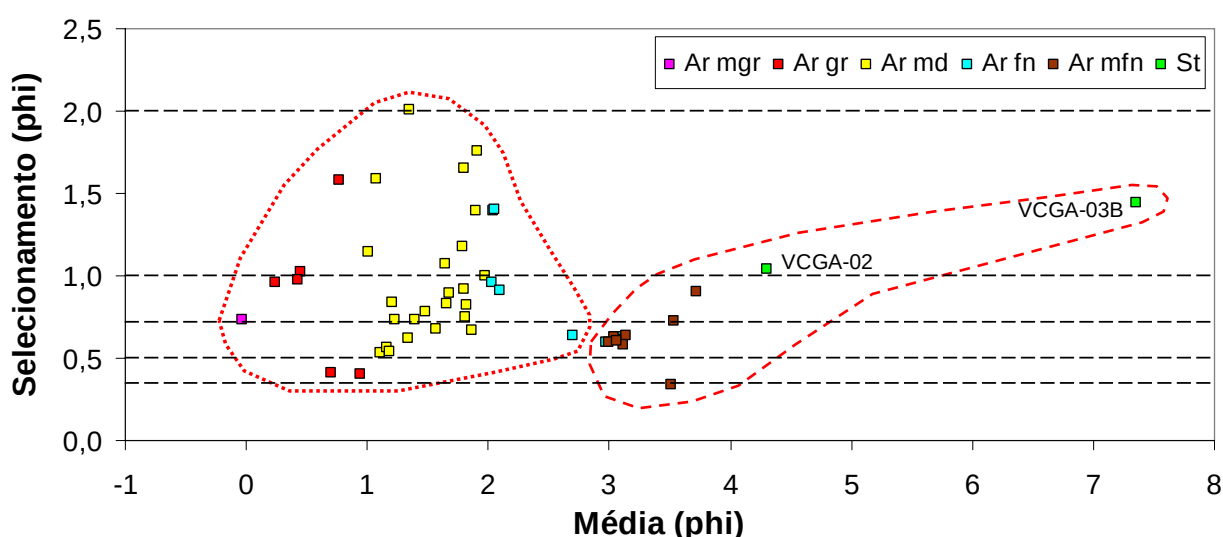


Figura 6.4. Diagrama de dispersão bivariada (média x selecionamento) das amostras do sistema Pisa Sal, Galinhos/RN no centro dos canais (pontilhado vermelho) e nas margens e bancos (tracejado vermelho). As amostras VCGA-02 e VCGA-03B constam em Dibbern (2007). As linhas tracejadas pretas representam os limites das classes de selecionamento.

A grande quantidade de classes de selecionamento deve-se às importantes variações na velocidade das correntes durante o período de maré, bem como durante as marés de sizígia e quadratura, uma vez que o fluxo anual de água doce (fluvial e pluvial) é insignificante.

O grau de assimetria de uma amostra é representado pelo afastamento entre o diâmetro médio e a mediana, de forma que os dados podem se dispersar para ambos os lados da média, indicando predominância de partículas finas ou grossas e assim definindo, respectivamente, uma simetria positiva ou negativa. O significado geológico deste parâmetro é bastante discutido, entretanto pode-se associar a capacidade que o agente transportador tem em transportar certo tamanho de partícula e depositar outro, tendendo à seleção das partículas depositadas.

O grau de assimetria no sistema Pisa Sal varia de muito negativa a muito positiva, com valores máximos de -0,634 e 0,385 phi. Esta variação ocorre tanto no centro do canal como nas margens/barras em pontal, bem como em relação às classes texturais (Figura 6.5), deixando clara a importância da variação na velocidade das correntes durante as fases da maré, causando uma heterogeneidade granulométrica na composição dos sedimentos, principalmente no centro do canal.

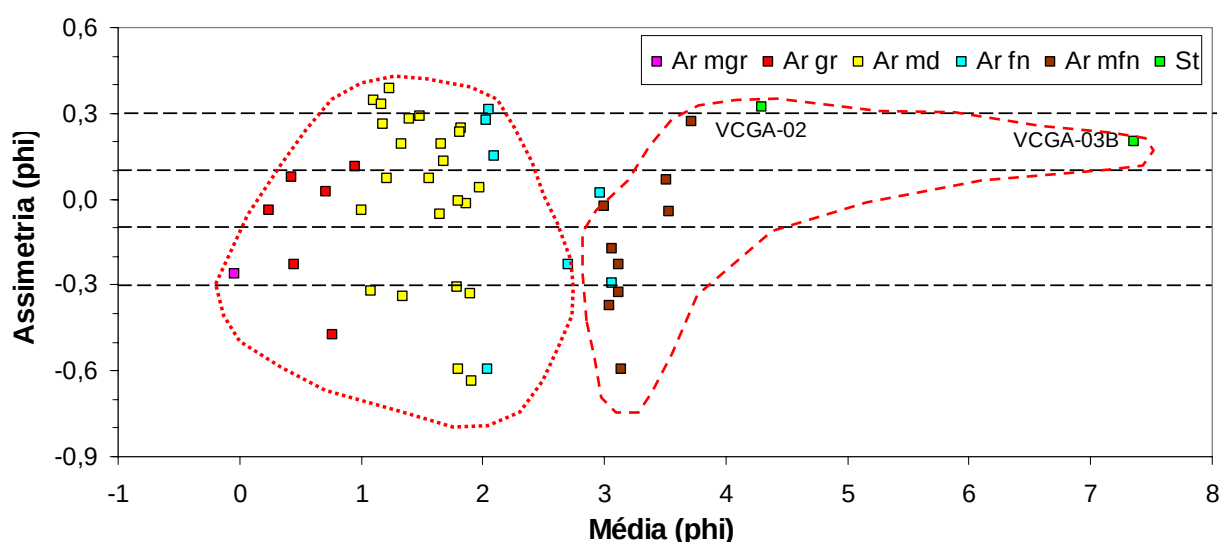


Figura 6.5. Diagrama de dispersão bivariada (média x assimetria) das amostras do sistema Pisa Sal, Galinhos/RN no centro dos canais (pontilhado vermelho) e nas margens e bancos (tracejado vermelho). As amostras VCGA-02 e VCGA-03B constam em Dibbern (2007). As linhas tracejadas pretas representam os limites das classes de assimetria.

As barras em pontais são constituídas por sedimentos arenosos, lamosos ou mistura de areia e lama. Em algumas destas, como no meandro próximo ao encontro

do Pisa Sal com Volta do Sertão e na margem esquerda do Pisa Sal, a composição é essencialmente lamosa e as amostras apresentam assimetria positiva (VCGA-03B = 0,2 phi) e muito positiva (VCGA-02 = 0,32 phi), respectivamente (Figura 6.5). Do mesmo modo, as amostras (PS1 e PS2) localizadas no canal em frente à amostra VCGA-03B também mostram assimetria positiva, evidenciando claramente uma mistura de sedimentos finos e grossos provenientes de fontes distintas.

6.4.1.2 Fácies Sedimentares

Foram identificadas 3 (três) fácies sedimentares de fundo ao longo dos canais do sistema Pisa Sal, a saber: Areia siliciclástica com grânulos e cascalho (AS1a), Areia siliciclástica (AS1b) e Lama terrígena (LL1). A fácies AS1a, ocorre exclusivamente, no centro dos canais, enquanto a fácies AS1b ocorre, principalmente, no centro do canais e, secundariamente, nas barras em pontais arenosas e a fácies LL1 ocorre, exclusivamente, nas barras em pontais lamosas.

- Areia Siliciclástica com Grânulos e Cascalhos (AS1a)

Esta fácies encontra-se distribuída no canal (Figura 6.6) com padrão sonográfico, mostrando reflexão homogênea média e presença de formas de leito tipo dunas 2-D pequenas e médias descritas no Capítulo 5 - Batimetria, Morfologia e Formas de Leito do Sistema Pisa Sal (Figura 5.7: 176 a 183 e Figura 5.9: 230 a 238).

O conteúdo de cascalho varia entre 15,58 e 18,36%, o de areia varia de 79,65 a 84,23% e o de lama, na ordem de 0,05 a 3,56%. Os teores de carbonato e matéria orgânica variam de 1,7 a 11,94% e de 1,0 a 2,23%, respectivamente (Tabela 6.2). O teor de carbonato presente está relacionado à grande quantidade de fragmentos conchas de moluscos com tamanho < 2,0 mm.

- Areia Siliciclástica (AS1b)

Apresenta-se com boa distribuição espacial ao longo do canal Pisa Sal, Volta do Sertão e Pisa Salzinho (Figura 6.6). É caracterizada por padrão sonográfico, mostrando reflexão homogênea média e presença de formas de leito do tipo dunas 2-D pequenas, médias e grandes descritas no Capítulo 5-Batimetria, Morfologia e Formas de Leito do Sistema Pisa Sal (Figura 5.9: 238 a 246 e Figura 5.10: 21 a 41).

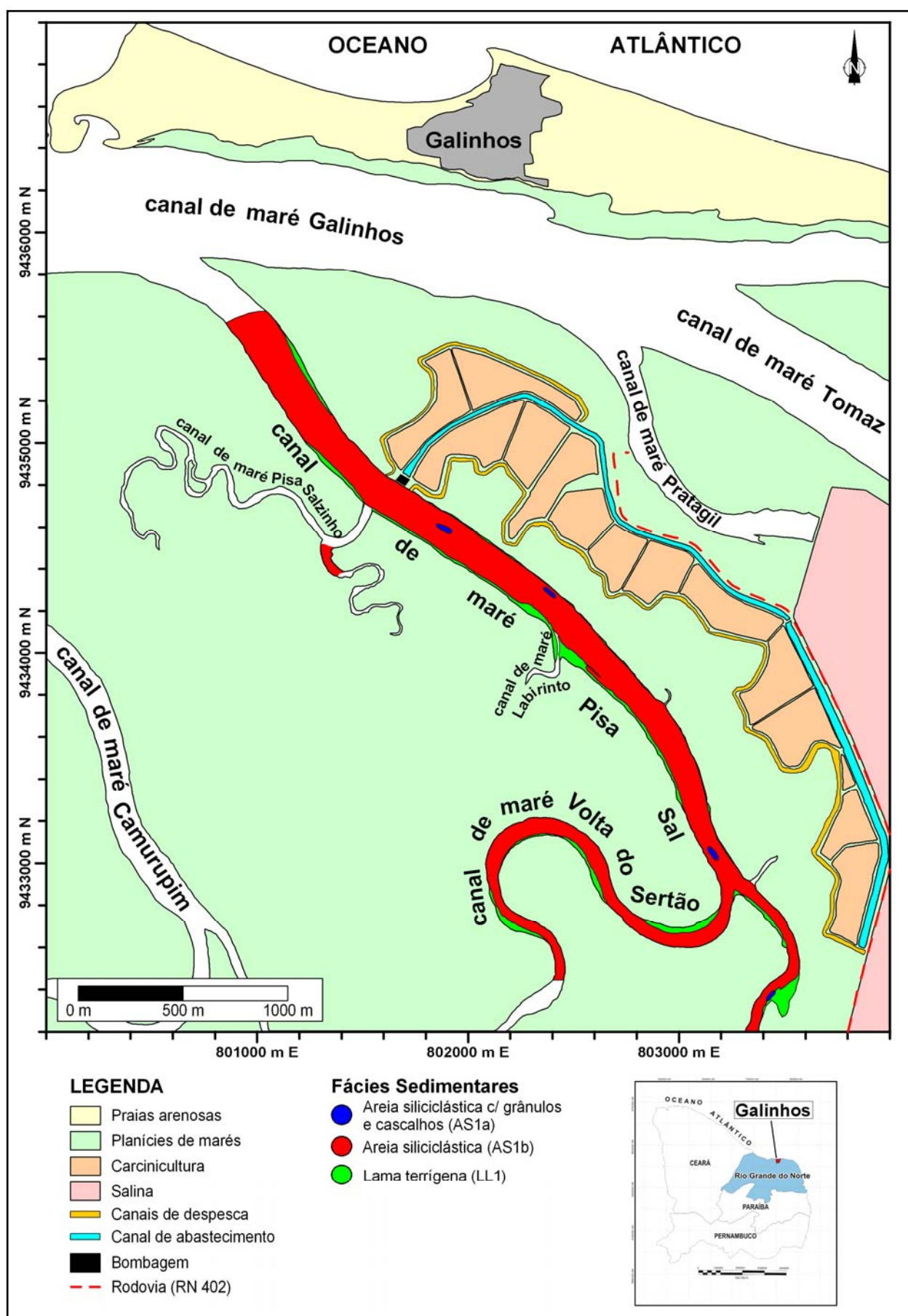


Figura 6.6. Distribuição de fácies sedimentares ao longo do sistema Pisa Sal, Galinhos/RN.

O conteúdo de cascalho varia de 0,0 a 14,46 %; o de areia varia de 82,67 a 99,66 % e o de lama, de 0,06 a 13,08 %. A concentração de carbonato e matéria orgânica, de 0,48 a 29,09% e 0,31 a 6,0 %, respectivamente (Tabela 6.2).

Tabela 6.2 Conteúdo de cascalho, areia, lama, carbonato e matéria orgânica nos sedimentos de fundo do sistema Pisa Sal.

Fácies		C	A	L	CB	MO
		(%)				
AS1a	max	18,36	84,23	3,56	11,94	2,23
	med	16,61	82,16	1,23	6,82	1,78
	min	15,58	79,65	0,05	1,70	1,00
AS1b	max	14,46	99,66	13,08	29,09	6,00
	med	3,54	94,97	1,48	10,02	2,01
	min	0,00	82,67	0,06	0,48	0,31
LL1	max	1,73	82,47	100,00	25,00	13,00
	med	0,43	51,80	47,76	20,10	7,36
	min	0,00	0,00	15,80	15,20	0,00

C= cascalho, A = areia, L =lama, CB = carbonato, MO = matéria orgânica.

- Lama Terrígena (LL1)

Esta fácies ocorre nas margens dos canais, principalmente, nos locais onde há formação de bancos lamosos (Figura 6.6) e está associada ao padrão sonográfico sem reflexão, característica da forma de leito tipo fundo plano (Figura 5.10: 8 a 31, Figura 5.11: 61 a 71 e Figura 12: 297 a 30e e 327 a 337).

O conteúdo de cascalho nesta fácies varia de 0,0 a 1,73 %, enquanto o de areia oscila de 0,0 a 82,47% e o de lama varia de 15,8 a 100,0 %. A concentração de carbonato varia de 15,2 a 25,0 % e a matéria orgânica, de 0,0 a 13,0 % (Tabela 6.2).

A composição mineralógica das fácies sedimentares acima descritas é constituída por uma mistura de partículas biogênicas e clásticas que ocorrem em proporções diferentes nas frações > 2,0 mm e < 2,0 mm. A fração > 2,0 mm é, exclusivamente, constituída por fragmentos de conchas de bivalves e gastrópodes, bem como por conchas de bivalves e gastrópodes em condições de vida. A presença de conchas de moluscos em condições de vida é comum nas zonas lamosas das barras em pontais e nas zonas de intermarés.

Por sua vez, a fração < 2,0 mm é predominantemente clástica, representada quase exclusivamente por grãos de quartzo, onde em algumas amostras ocorrem traços de quartzo esfumaçado e quartzo com presença de oxidação. Minerais pesados também ocorrem em concentrações máximas de 1%, dentre os quais se destaca a magnetita (traços a 1%). A fração biogênica é constituída por fragmentos de conchas de bivalves e gastrópodes responsáveis pelo conteúdo de carbonato nos sedimentos

Os grãos de quartzo mostram-se, predominantemente, arredondados (29,41%) a sub-arredondados (29,18%), ocorrendo também grãos bem arredondados (17,12%), sub-angulosos (17,62%) e angulosos (6,67%). A superfície dos grãos apresenta-se polida na sua quase totalidade.

6.4.1.3 Fontes e Sumidouros de Sedimentos

A área fonte de sedimentos para o sistema Pisa Sal está relacionada exclusivamente à geologia local, uma vez que ausência de fluxo fluvial e baixa precipitação pluviométrica impedem o transporte de partículas de áreas mais distantes. Nesse sentido, as correntes de marés, os ventos e as chuvas locais desempenham importante papel na erosão e transporte de sedimentos. As chuvas, mesmo em menor significância, contribuem com o processo erosivo. Secundariamente, sedimentos costeiros podem ser carregados pelas correntes de enchente para a foz do sistema Pisa Sal.

As principais fontes de sedimentos de fundo do sistema Pisa Sal são os sedimentos areno lamosos das planícies de supramaré e os sedimentos eólicos fixos (Figura 6.7 e 6.8) que, uma vez erodidos, são transportados pela ação das correntes de marés e ventos, bem como os sedimentos lamosos das planícies de intermarés e de inundação (Figuras 6.7) erodidos e transportados pelas correntes de marés.

A figura 6.9 mostra que os sedimentos das planícies de marés e os eólicos são constituídos, predominantemente, pela fácies Areia siliciclástica (AL1b) dos sedimentos de fundo do sistema Pisa Sal (Figura 6.6). Mesmo as demais fácies que ocorrem nos perfis apresentam um importante componente clástico que será transportado para o sistema.

A fração lamosa dos sedimentos de supramaré, de intermaré e os areno-lamosos da planície de inundação são transportados em grandes quantidades em suspensão pelas correntes de marés e depositam-se nas margens e na desembocadura do sistema, formando bancos lamosos e arenosos.

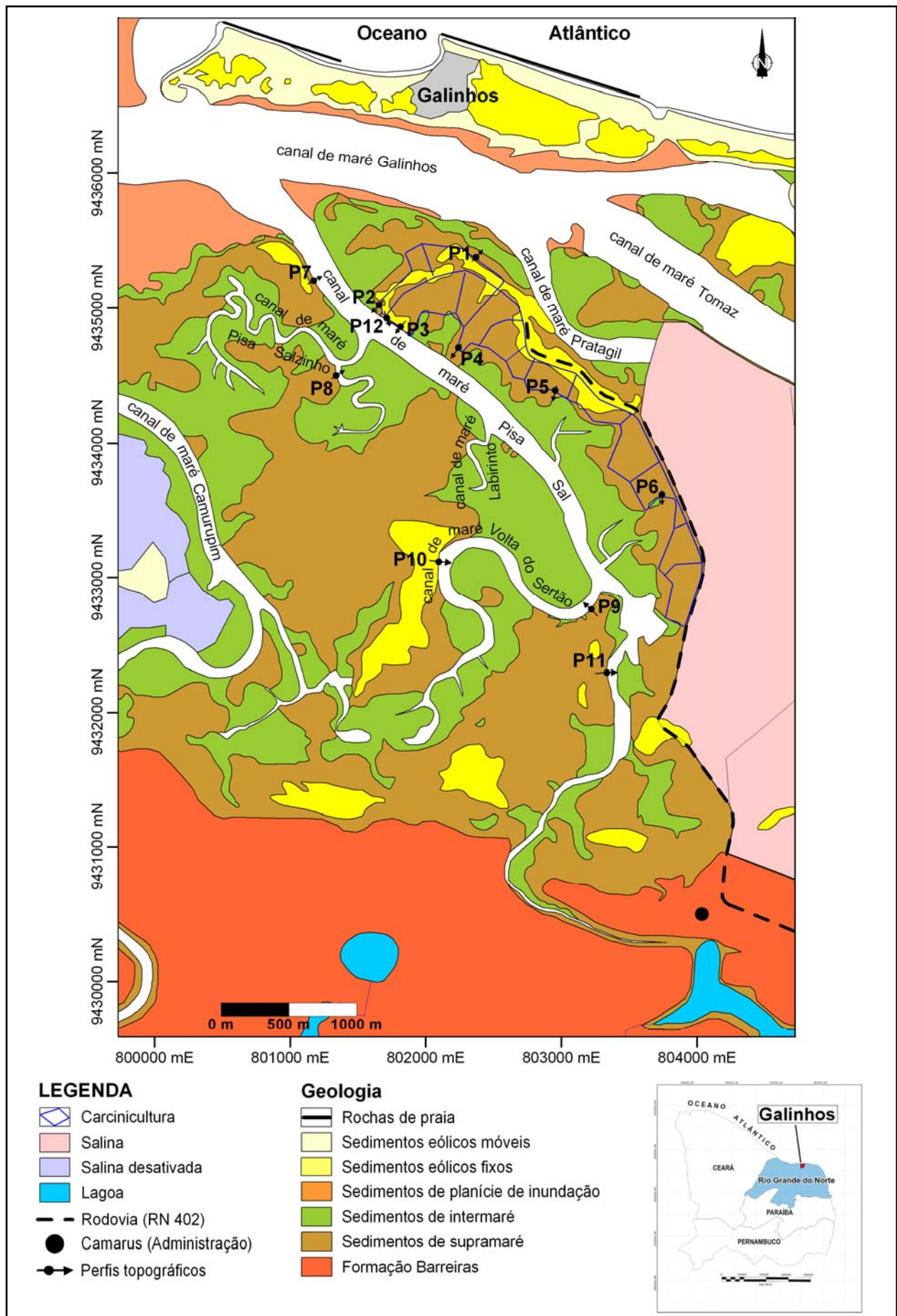




Figura 6.8. Sedimentos areno lamosos de supramaré com escarpa de erosão em frente ao P9 (A) e sedimentos arenosos eólicos fixos com escarpa de erosão em frente aos perfis P10 (B). As imagens em detalhe mostram a erosão nas margens dos canais com destruição do mangue (A) e da caatinga (B).

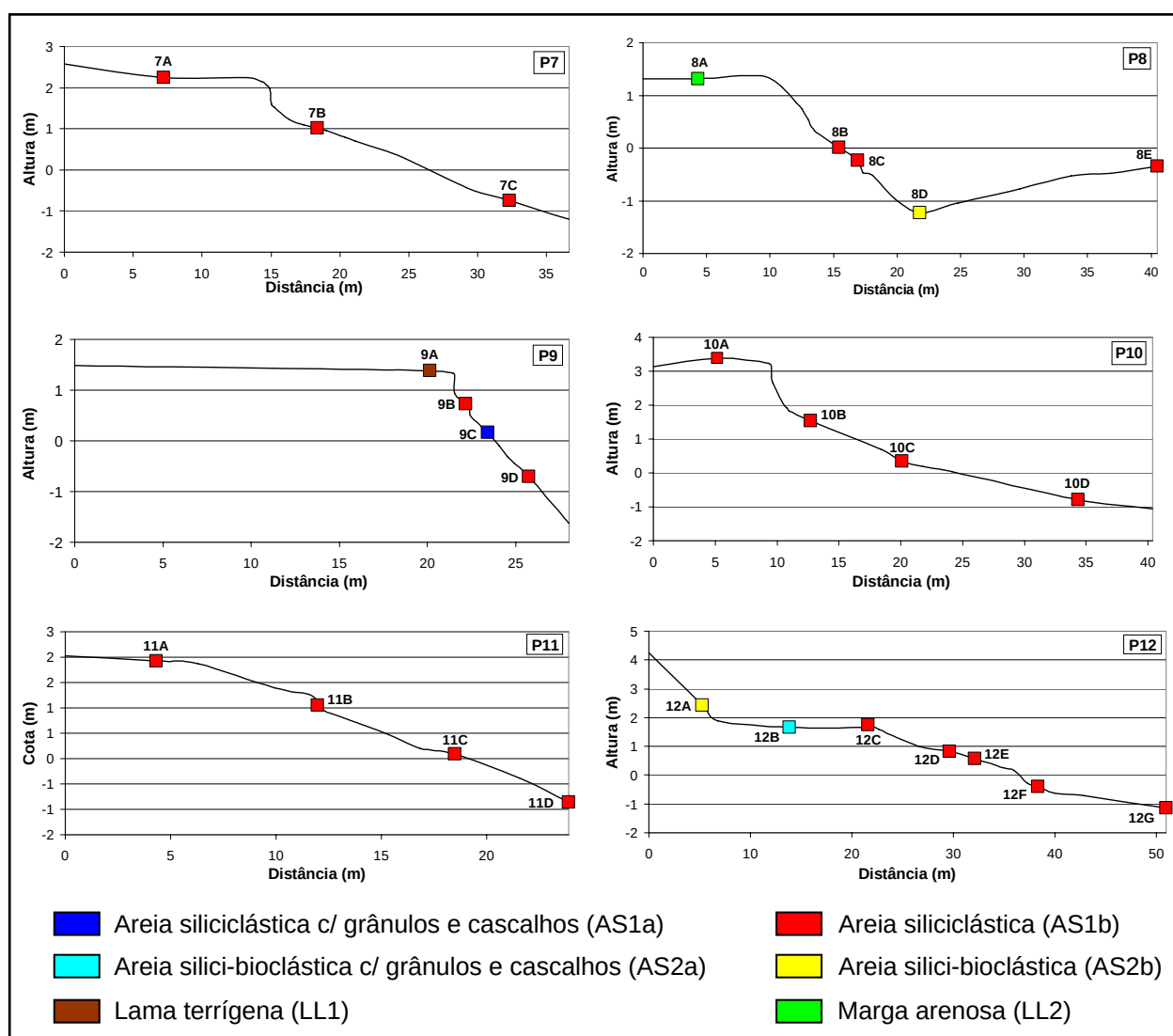


Figura 6.9. Fácies sedimentares ao longo dos perfis topográficos perpendiculares às margens dos canais do Pisa sal, Volta do Sertão e Pisa Salzinho, Galinhos/RN. A localização dos perfis está na figura 6.8.

Secundariamente, os sedimentos da Formação Barreiras, durante o período de chuvas, podem ser carregados para o sistema, entretanto, o volume de material é pequeno.

O sumidouro de sedimentos do sistema Pisa Sal está, predominantemente, relacionado à ação das fortes correntes de marés vazantes que transportam partículas por tração de fundo e suspensão em direção a desembocadura do complexo estuarino lagunar de Galinhos-Gumaré. Secundariamente, ocorrem perdas de sedimento pelo transporte eólico nas planícies de supramaré e nas zonas de planície de inundação quando nas baixa-mares, seja em direção aos canais ou em direção às porções emersas.

6.4.2 Canais de Despesca (CDs)

6.4.2.1 Textura dos Sedimentos e Parâmetros Estatísticos

Nas campanhas de amostragem dos CDs realizadas no período de verão (dezembro de 2005) e inverno (junho de 2006), os sedimentos de fundo apresentaram a mesma variação de classes texturais do sistema Pisa Sal, a saber: Areia muito grossa (Ar mgr), Areia grossa (Ar gr), Areia média (Ar md), Areia fina (Ar fn), Areia muito fina (Ar mfn) e Silte (St) (Figura 6.10), variando entre os limites granulométricos de 1,801 e 0,015 mm (areia muito grossa a silte fino). Entretanto, mostram diferenciação, quando comparadas entre si.

A análise das amostras coletadas no verão e no inverno mostra que, além de ocorrer uma variação textural em relação ao período de estiagem e das chuvas, ocorre também uma variação entre o centro e as margens dos canais.

De uma forma geral, durante o período do verão, predominam as classes texturais mais finas (areia fina, areia muito fina e silte) e, durante o inverno, as fácies variam de areia muito grossa até silte. No centro do canal, durante o verão, ocorrem fácies areia muito fina até silte, enquanto, durante o inverno ocorrem, as fácies areia grossa até silte, mostrando, claramente, um aumento de granulometria durante o inverno, exceto no perfil P6 onde ocorre uma diminuição na granulometria em função da baixa energia das correntes que não conseguem transportar os finos que entram nos canais provenientes das margens e taludes. Nas margens, este aumento de granulometria também é observado (Figura 6.10).

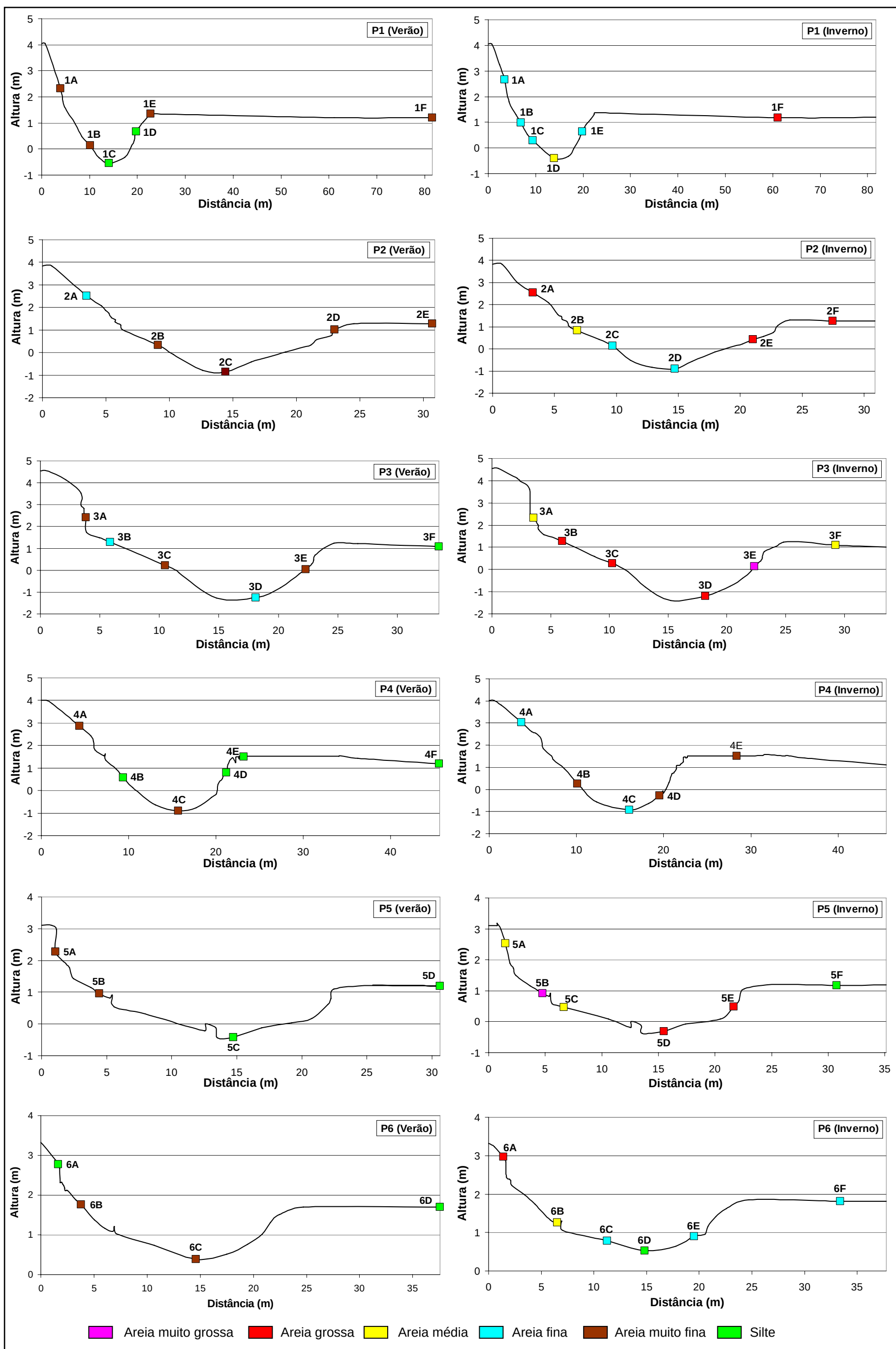


Figura 6.10. Classificação textural (diâmetro médio) dos sedimentos de fundo no centro do CD1 (P3 a P6) e CD2 (P1 e P2). As amostras foram coletadas em frente aos perfis do monitoramento topográfico no período de verão (dezembro/2005) e inverno (junho/2006). A localização dos perfis está na figura 6.8.

No verão o percentual de cascalho, areia e lama variou de 0,0 a 0,03 %, 3,66 a 85,35 % e 14,62 a 96,34 %, respectivamente, enquanto, no inverno, esse percentual apresentou os seguintes limites: 0,0 a 36,79 %, 59,15 a 88,41 % e 3,94 a 35,51 % (Figura 11). A figura supra citada mostra uma redução significativa da quantidade de lama nos sedimentos durante o período de inverno, exceto no perfil P6 onde o percentual de lama praticamente não sofre alteração devido à baixa energia das correntes de marés, bem como um aumento significativo do teor de cascalho nos perfis P1, P3 e P5.

No geral, o grau de seleção das partículas varia de moderadamente a muito pobremente selecionado, entretanto não sofrem variações significantes, quando comparadas em relação ao verão e inverno. No verão, o grau de seleção varia de pobremente a muito pobremente selecionado, predominando pobremente selecionado, enquanto, no inverno, esta relação também acontece e apenas algumas amostras apresentam-se moderadamente e muito pobremente selecionadas (Figura 6.12). Durante o verão, as amostras do centro e das margens dos canais apresentam graus de seleção semelhantes, entre pobremente e muito pobremente selecionados, onde as amostras do centro são pobremente (50 %) a muito pobremente (50 %) selecionadas e as das margens são predominantemente pobremente selecionadas. Entretanto, no inverno, ocorre uma pequena variação: a maioria das amostras é pobremente selecionada, com apenas uma amostra no centro e três amostras nas margens dos canais apresentando-se muito pobremente selecionadas, além de três amostras moderadamente selecionadas no centro dos canais (Figura 6.12).

De uma maneira geral, o grau de assimetria mostra classes variando de aproximadamente simétrica a muito positiva, com predominância das classes positiva e muito positiva. Esta relação também é estabelecida, quando comparadas amostras do verão com as do inverno. As amostras do centro dos canais, durante o verão e inverno, não diferem da classificação geral, entretanto, no inverno, uma amostra (2D) apresenta-se aproximadamente simétrica. A relação acima descrita também ocorre nas margens, porém apresentando um maior número de amostras aproximadamente simétricas (Figura 6.13). As figuras 6.12 e 6.13 também mostram a diminuição do diâmetro médio das partículas no inverno.

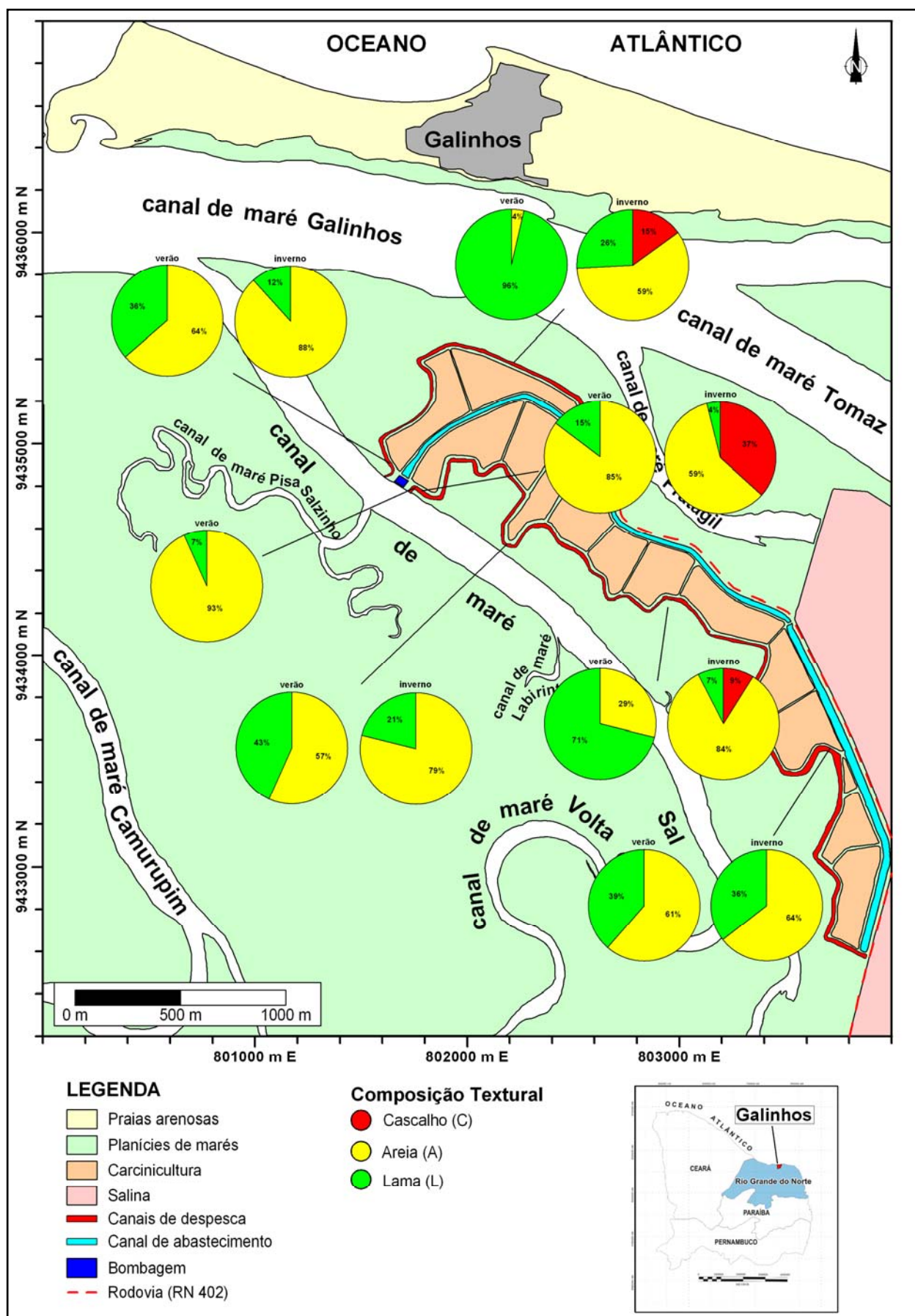


Figura 6.11. Conteúdos de cascalho, areia e lama nos sedimentos de fundo no centro do CD1 (P3 a P6) e CD2 P1 e P2). As amostras foram coletadas em frente aos perfis do monitoramento topográfico no período de verão (dezembro/2005) e inverno (junho/2006). O perfil P13 foi amostrado somente no verão.

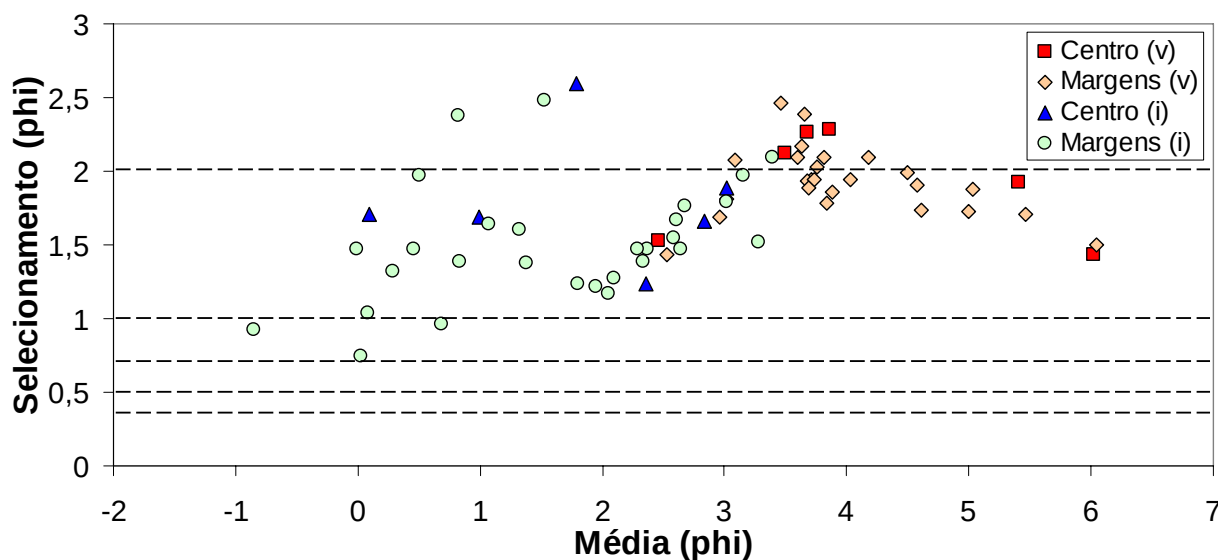


Figura 6.12. Diagrama de dispersão bivariada (média x seleção) das amostras no centro e margens dos CDs nos períodos de verão (v) e inverno (i). As linhas tracejadas pretas representam os limites das classes de seleção.

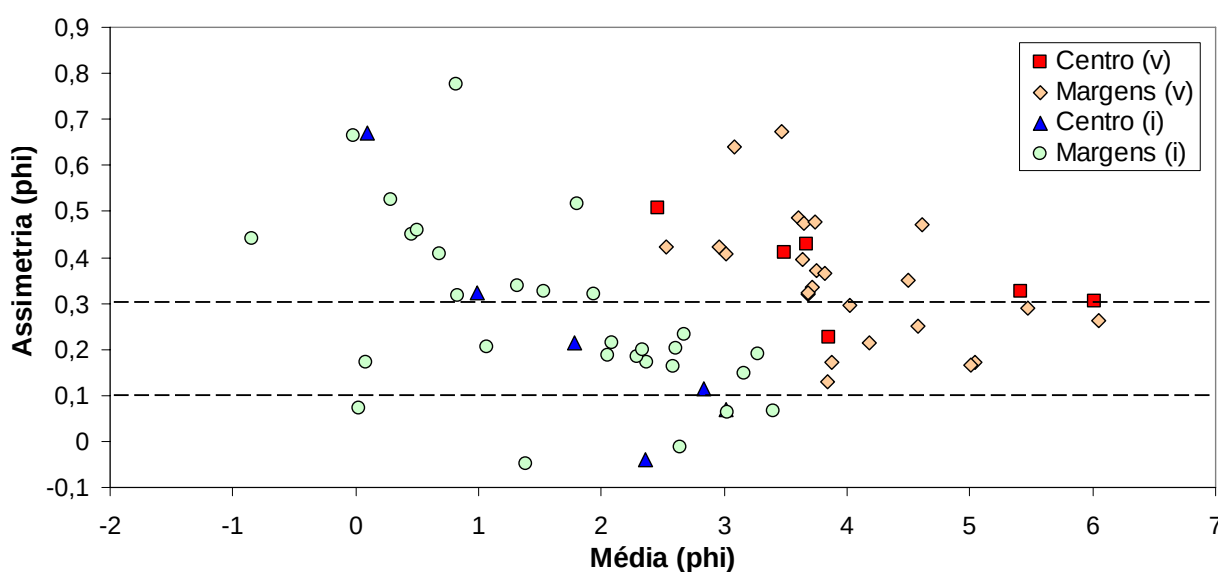


Figura 6.13. Diagrama de dispersão bivariada (média x assimetria) das amostras no centro e margens dos CDs nos períodos de verão (v) e inverno (i). As linhas tracejadas pretas representam os limites das classes de seleção.

6.4.2.2 Fácies Sedimentares

Foram identificadas 6 (seis) fácies sedimentares nos CDs nas campanhas de verão e inverno, a saber: Areia biosiliciclástica com grânulo e cascalhos (AB1a), Areia siliciclástica c/ grânulos e cascalhos (AS1a), Areia siliciclástica (AS1b), Areia silicibioclástica (AS2b), Lama terrígena (LL1) e Marga arenosa (LL2) e que serão

caracterizadas a seguir. As fácies AS1b, LL1 e LL2 são as que mostram maior percentual e melhor distribuição nos CDs.

- Areia biosiliciclástica com grânulos e cascalhos (AB1a)

Apenas uma amostra (1D, perfil P1) da campanha de inverno foi classificada nesta fácies (Figura 6.14) e apresenta as seguintes quantidades de cascalho, areia e lama: 15,10 %, 59,15 % e 25,75 %, respectivamente. O teor de carbonato é 65,30 % e o de matéria orgânica é 9,28 (Tabela 6.3).

A quantidade de grânulo e cascalho, bem como a elevada concentração de carbonato deve-se à presença de importantes comunidades de bivalves que se desenvolvem na área.

- Areia siliciclástica com grânulos e cascalhos (AS1a)

Esta fácies ocorre no centro dos canais em apenas quatro amostras na campanha de inverno nos perfis P3, P5 e P6 (Figura 6.14) e no centro dos canais, no sistema Pisa Sal (Figura 6.6). Os conteúdos médios de cascalho, areia e lama variam, respectivamente, de 36,58 %, 60,13 % e 3,29 % (Tabela 6.3). O elevado percentual de cascalho refere-se às conchas de moluscos, principalmente, bivalves, inclusive em condições de vida.

O teor médio de carbonato é de 22,42 %, enquanto o de matéria orgânica é de 2,90 % (Tabela 6.3). O teor de carbonato e o percentual de cascalho estão relacionados a grande quantidade de fragmentos de conchas de moluscos.

- Areia siliciclástica (AS1b)

Ocorre na campanha de verão somente no centro do canal no perfil P3, enquanto, no inverno, ocorre em praticamente todos os perfis, exceto no P4. Esta fácies é a que apresenta melhor distribuição espacial no centro dos canais do sistema Pisa sal (Figura 6.6). Todas as amostras da campanha de inverno no perfil P2 estão classificadas nesta fácies (Figura 6.14). Apresenta quantidades médias de cascalho, areia e lama no verão e inverno, que variam, respectivamente, na ordem de 8,14 a 4,45 %, 82,28 a 88,89 % e 9,58 a 6,66 %. Os teores médios de carbonato nas duas campanhas mostram variação de 22,31 a 16,52 % e o de matéria orgânica varia de 3,08 a 2,95 % (Tabela 6.3).

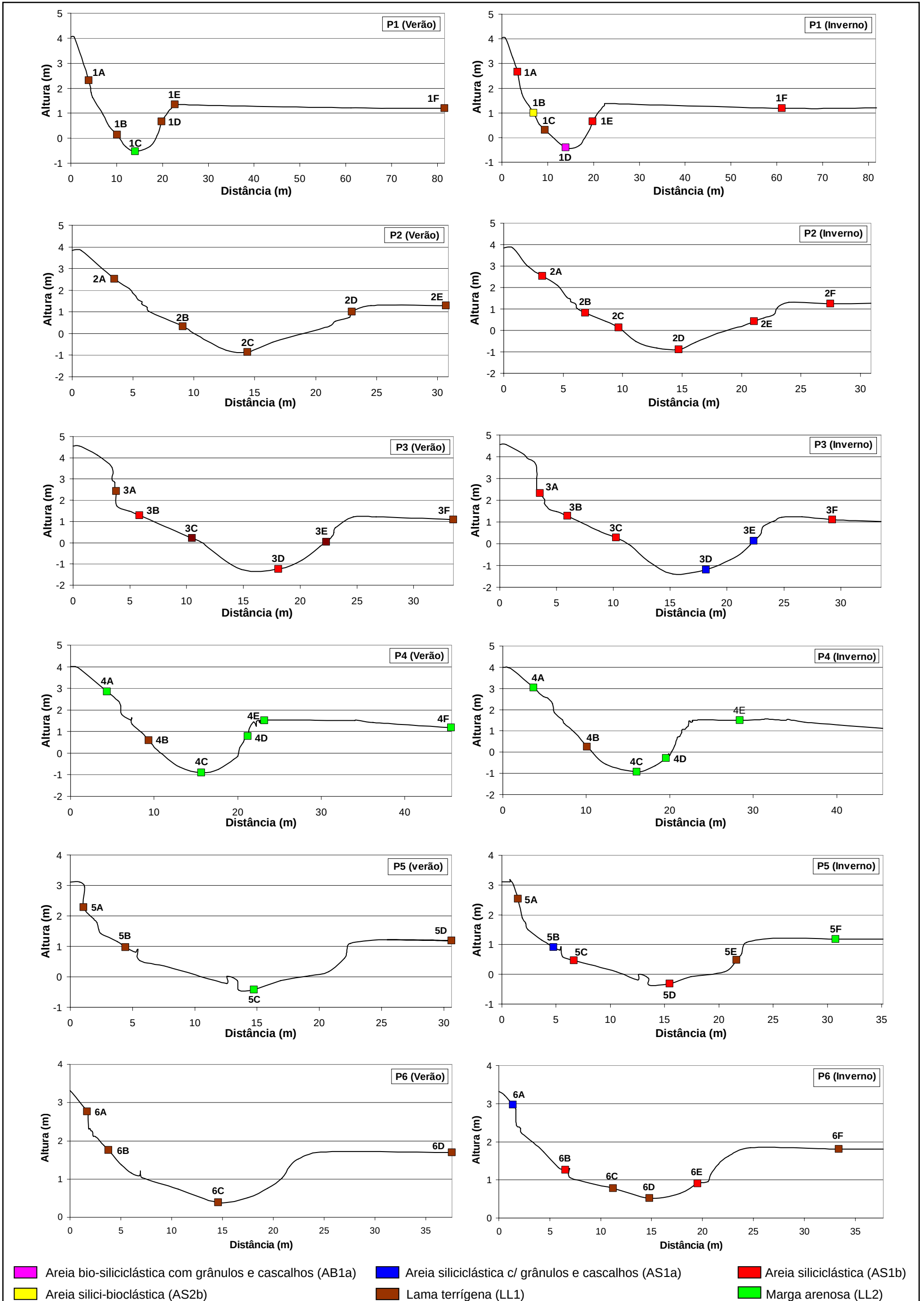


Figura 6.14. Fácies sedimentares do centro do CD1 (P3 a P6) e CD2 (P1 a P2). As amostras foram coletadas em frente aos perfis do monitoramento topográfico no período de verão (dezembro/2005) e inverno (junho/2006). A localização dos perfis está na figura 6.8.

Tabela 6.3. Concentrações máximas, médias e mínimas de cascalho, areia, lama, carbonato e matéria orgânica nos sedimentos dos canais de drenagens (CDs) da empresa Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda nas campanhas de verão (dez/2005) e inverno (junho/2006). As fácies AB1a, AS1a e AS2b não foram identificadas na campanha de verão.

Fácies		VERÃO					INVERNO				
		C	A	L	CB	MO	C	A	L	CB	MO
		(%)					(%)				
AB1a*	max						15,10	59,15	25,75	65,30	9,28
	med						15,10	59,15	25,75	65,30	9,28
	min						15,10	59,15	25,75	65,30	9,28
AS1a**	max						42,67	64,55	5,97	29,29	9,74
	med						36,58	60,13	3,29	22,42	2,90
	min						29,48	54,88	0,79	13,46	0,00
AS1b	max	23,55	98,14	22,15	29,18	4,05	13,95	96,49	13,34	29,39	7,63
	med	8,14	82,28	9,58	22,31	3,08	4,45	88,89	6,66	16,52	2,95
	min	0,00	70,84	0,98	12,45	2,19	0,00	81,52	0,18	3,81	0,00
AS2b*	max						0,15	85,46	14,39	31,02	5,83
	med						0,15	85,46	14,39	31,02	5,83
	min						0,15	85,46	14,39	31,02	5,83
LL1	max	0,10	79,75	93,15	29,85	9,18	23,69	82,72	35,51	29,05	7,51
	med	0,01	60,85	39,14	19,98	5,18	5,59	71,40	23,02	20,60	3,03
	min	0,00	6,85	20,24	7,71	1,67	0,00	59,07	17,24	8,00	0,47
LL2	max	0,00	56,79	96,34	45,68	10,79	0,11	83,12	40,06	55,86	2,29
	med	0,00	33,68	66,32	40,25	6,92	0,05	72,33	27,62	44,05	0,79
	min	0,00	3,66	43,21	34,38	3,48	0,00	59,89	16,78	33,23	0,00

C = cascalho, A = areia, L = lama, CB = carbonato, MO = matéria orgânica.

*Apenas 1 amostra cada.

**4 amostras.

- Areia silicibioclástica (AS2b)

Apresenta baixa distribuição espacial nos CDs, ocorrendo em apenas uma amostra (1B) no centro do canal no perfil P1 durante a campanha de inverno (Figura 6.14), apresentando conteúdos de cascalho, areia e lama na ordem de 0,15 %, 85,46 % e 14,39 %, respectivamente. O teor de carbonato é de 31,02 % e o de matéria orgânica é de 5,83 % (Tabela 6.3).

- Lama terrígena (LL1)

Esta fácies ocorre nas duas campanhas de amostragem, entretanto, na campanha de verão, mostra maior distribuição nos perfis. Na campanha de inverno, não estão presentes semente nos perfis P2 e P3 (Figura 6.14). Apresenta conteúdos médios de cascalho, areia e lama, variando de 0,01 a 5,59 %, 60,85 a 71,40 % e 39,14

a 23,02 %, respectivamente (Tabela 6.3). Os percentuais médios de carbonato e matéria orgânica variam de 19,98 a 20,60 % e de 5,18 a 3,03 %, respectivamente.

- Marga arenosa (LL2)

De uma forma geral, esta fácies mostra boa distribuição nos perfis nas duas campanhas de amostragem. No verão, ocorre no centro dos perfis P1, P4 e P5, além de ocorrer nas margens do P4, enquanto, no inverno, ocorrem somente no centro e margem do P4 e na margem do P5. O perfil P4 apresentou-se sem variação faciológica nas duas campanhas de amostragem. Os percentuais médios de cascalho, areia e lama nas duas campanhas de amostragem apresentaram as seguintes variações: 0,0 a 0,05 %, 33,68 a 72,33 % e 66,32 a 27,62 %, enquanto os teores de carbonato e matéria orgânica variaram, respectivamente, de 40,25 a 44,05 % e 6,92 a 0,79 %.

A composição mineralógica das fácies sedimentares de fundo dos CDs é constituída por partículas clásticas e biogênicas. A fração maior que 2,0 mm é exclusivamente biogênica, na qual ocorrem conchas de bivalves em condições de vida e fragmentos de conchas de bivalves e gastrópdes.

A fração < 2,0 mm é constituída exclusivamente por grãos de quartzo e traços de minerais pesados opacos, dentre os quais se destaca a magnetita (5A, 5C, 5D, 6A, 6C, 6D, 6E e 6F) (Figura 6.14). Os grãos de quartzo mostram-se, predominantemente, sub-arredondados (35,57%) a arredondados (28,77%), seguindo-se de grãos sub-angulosos (19,67%), bem arredondados (10,83%) e angulosos (5,16%) (Tabela 6.4). A superfície dos grãos apresenta-se polida e fosca.

Tabela 6.4. Classes de arredondamento dos grãos de quartzo nos sedimentos de fundo dos CDs.

CDs	CLASSES DE ARREDONDAMENTO				
	bar	arr	sar	sag	ang
1 + 2	10,83	28,77	35,57	19,67	5,16
1	12,41	34,84	33,03	15,27	4,44
2	8,08	18,17	40,00	27,33	6,42

bar = bem arredondado, arr = arredondado, sar = sub-arredondado, sag = sub-angulosos, ang = anguloso

Comparando o grau de arredondamento das partículas do CD 1 e do CD2 observa-se uma diferença importante entre as classes arredondado e sub-arredondado, mostrando que, no CD1, os grãos apresentam maiores percentuais de

arredondados e sub-arredondados, enquanto, no CD 2, os maiores percentuais são de sub-arredondados e sub-angulosos (Tabela 6.4), indicando um melhor retrabalhamento dos grãos pelas correntes de marés no CD1 e que são importantes para as conclusões sobre o transporte de sedimentos.

As amostras de 1A a 6A (Figura 6.14) de todos os perfis nas campanhas de verão e inverno estão localizadas nos taludes dos viveiros e representam a composição da área onde se encontra os CDs, pois foi utilizado na construção dos taludes dos viveiros o material dragado dos canais de despesca da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda. que é constituído por sedimentos areno lamosos dos sedimentos de supramaré onde se desenvolve importante comunidade de bivalves, como também das areias eólicas fixas como mostra a figura 6.7. Assim, o material dos taludes é constituído por uma mistura de areia, lama e grande quantidade de conchas de moluscos, principalmente bivalves, com tamanho que varia de 1,0 cm até 10,0 cm.

A dragagem e o transporte destes sedimentos provocam um aumento no volume em função do aumento do índice de vazios entre as partículas sólidas (empolamento), tornando-as mal selecionadas, principalmente devido ao tamanho e forma das conchas de bivalves dispersas em uma matriz areno lamosa que associadas à falta de manutenção permanente dos taludes (Figura 6.15) contribuem para o incremento do processo erosivo por ação das correntes de marés no sopé do talude, pelas chuvas, lixiviando as paredes do talude e pelos ventos, transportando as partículas finas dos taludes para o interior dos CDs.



Figura 6.15. Talude do viveiro em frente ao P3 com grande quantidade de conchas de bivalves (branco) e ravinamentos. (R). Em detalhe a mistura de sedimentos areno lamosos com conchas de bivalves.

De uma forma geral, observa-se que, na maioria dos perfis, exceto no perfil P5, ocorre mudança faciológica entre a campanha de verão e a de inverno, seja devido ao aumento do teor de carbonato, seja pelo aumento de granulometria que, neste caso, está associada às conchas de moluscos. Em alguns perfis, essas mudanças acontecem em alguns trechos, como nos perfis P3 e P6. Apenas o perfil P4 não mostrou variação faciológica (Figura 6.14).

6.4.2.3 Fonte e Sumidouro de Sedimentos

Os sedimentos de fundo que ocorrem nos CDs estão associados às seguintes fontes:

- Areias lamosas de supramaré (Figura 6.16), as lamas de intermaré e as areias eólicas fixas (Figura 6.7).
- Sedimentos dos taludes dos viveiros (Figura 6.17).
- Material do interior dos viveiros: sedimentos (Figura 18), restos de ração, carapaças e fezes de camarão.
- Materiais de composição cálcica: calcário e cal virgem (Figura 6.19).
- Fauna de moluscos: conchas em posição de vida e fragmentos de conchas.



Figura 6.16. Erosão da planície de supramaré pela ação das marés de sizígia e das correntes de marés (margem esquerda do CD 1 em frente ao P4). O detalhe mostra a pluma de sedimentos em suspensão transportada tanto pelas correntes de vazante quanto de enchente.



Figura 6.17. Material do talude dos viveiros erodido e transportado para o interior dos CDs em frente ao perfil P3 (A) e entre o P3 e P4 (B).



Figura 6.18. Areia muito fina e silte transportados dos viveiros (ao fundo) pela ação dos ventos, recobrendo as conchas nos taludes (próximo ao perfil P5). O detalhe mostra marcas de ondas de origem eólica.



Figura 6.19. Transporte da cal virgem pelo vento durante o processo de distribuição pelo viveiro. O CD 1 está localizado à esquerda da foto, no sentido da direção do vento.

Os sedimentos de supramaré e intermaré que constituem a principal fonte de sedimentos para os CDs são erodidos e transportados, principalmente, pelas correntes de marés, e secundariamente, pelos ventos.

As areias eólicas fixas na área dos viveiros da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda. (Figura 6.7) foram totalmente descaracterizadas pelo aplainamento durante a construção do empreendimento e utilizadas na construção dos taludes. Atualmente, esses sedimentos encontram-se como fundo de viveiro e seu aporte para os CDs ocorre durante o processo de despesca e, indiretamente, agregado ao material dos taludes.

As perdas de sedimentos de fundo dos canais ocorrem, predominantemente, por ação do transporte de sedimentos de fundo e suspensão pelas correntes de marés de vazante em direção ao canal do Pisa Sal.

6.5 DISCUSSÕES

Os sedimentos de fundo do sistema Pisa Sal e os dos canais de despesca da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda. estão agrupados nas mesmas classes texturais, a saber: Areia muito grossa (Ar mgr), Areia grossa (Ar gr), Areia média (Ar md), Areia fina (Ar fn), Areia muito fina (Ar mfn) e Silte (St).

As fácies mais grossas ocorrem no centro dos canais, enquanto as mais finas, nas margens, mostrando, claramente, a ação das fortes correntes de marés ao longo dos canais. A relação areia-lama no centro dos canais é bastante elevada, corroborando com o processo de transporte de alta energia, o que também é reforçado pela baixa ocorrência de argila nos sedimentos.

Por outro lado, na margem esquerda do canal Pisa Sal observa-se a presença de fácies areia muito fina e silte, enquanto, na margem direita, predominam fácies areia média e fina. Esta diferenciação de granulometria nas margens está relacionada a configuração sinuosa do canal que provoca a redução da velocidade das correntes de marés nas porções côncavas, permitindo a deposição de partículas de granulometria mais fina (Figura 6.2).

A grande variação no grau de seleção das partículas (muito bem a muito pobremente selecionado) pode indicar uma heterogeneidade na velocidade das correntes de marés de vazante e enchente e/ou da fonte de sedimentos. Da mesma forma, o grau de assimetria vem a reforçar essa heterogeneidade, quando apresenta

as classes, variando de muito negativa a muito positiva, indicando uma tendência tanto para o lado das partículas grossas quanto para as partículas finas. Os parâmetros estatísticos, tais como a média e a mediana, além dos valores de phi 50 e phi 90 serão importantes para o cálculo do transporte de sedimentos de fundo e suspensão no canal Pisa Sal que será apresentado no Capítulo 9 - Transporte de Sedimentos no Sistema Pisa Sal.

O estudo realizado por Röber *et al.* (2005) na região de Galinhos/RN classificou texturalmente os sedimentos de fundo baseado na sua localização e no tamanho médio dos grãos em quatro grupos: *spit*, transição (*transition*), canal principal (*main channel*) e estreito (*narrow part*), além de uma zona de conexão de canais (*connecting channel*) que, pelas suas características, pode ser correlacionada à zona de transição (Figura 6.20A). A caracterização textural das zonas de transição e do canal principal é importante para a comparação com os resultados adquiridos nesta pesquisa, uma vez que a primeira zona encontra-se em frente à desembocadura do canal do Pisa Sal e a segunda, no centro dos canais de Galinhos, Tomaz e Pratagil, podendo assim estabelecer um paralelo entre os diferentes canais que compõem o sistema estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré.

Segundo Röber (*op cit.*), a zona de transição é, predominantemente, constituída por areias finas pobremente selecionadas (Figura 6.20B), com sua textura tornando-se mais fina à medida que a velocidade da corrente diminui e a profundidade do canal aumenta. Na zona do canal principal, a textura varia de silte grosso a fino, com selecionamento muito pobre e assimetria muito positiva a muito negativa (Figuras 6.20B e 6.20C).

De uma forma geral, as duas campanhas de amostragem nos CDs mostraram classes texturais distintas. No verão, ocorrem as fácies areia fina até silte e, no inverno, ocorrem as fácies areia muito grossa até silte, além de fácies mais grossas, indicando um aumento no diâmetro médio das partículas durante o inverno, provocado pelo aumento da velocidade das correntes que transportam os finos e pelo aporte de partículas grossas oriundas dos taludes dos viveiros. As relações areia:lama e cascalho:areia variam com o verão e inverno. Observa-se no inverno uma redução no conteúdo de lama e um aumento no conteúdo de cascalho, respectivamente (Figura 6.11), indicando o forte transporte de finos e formação de depósitos residuais no centro dos canais.

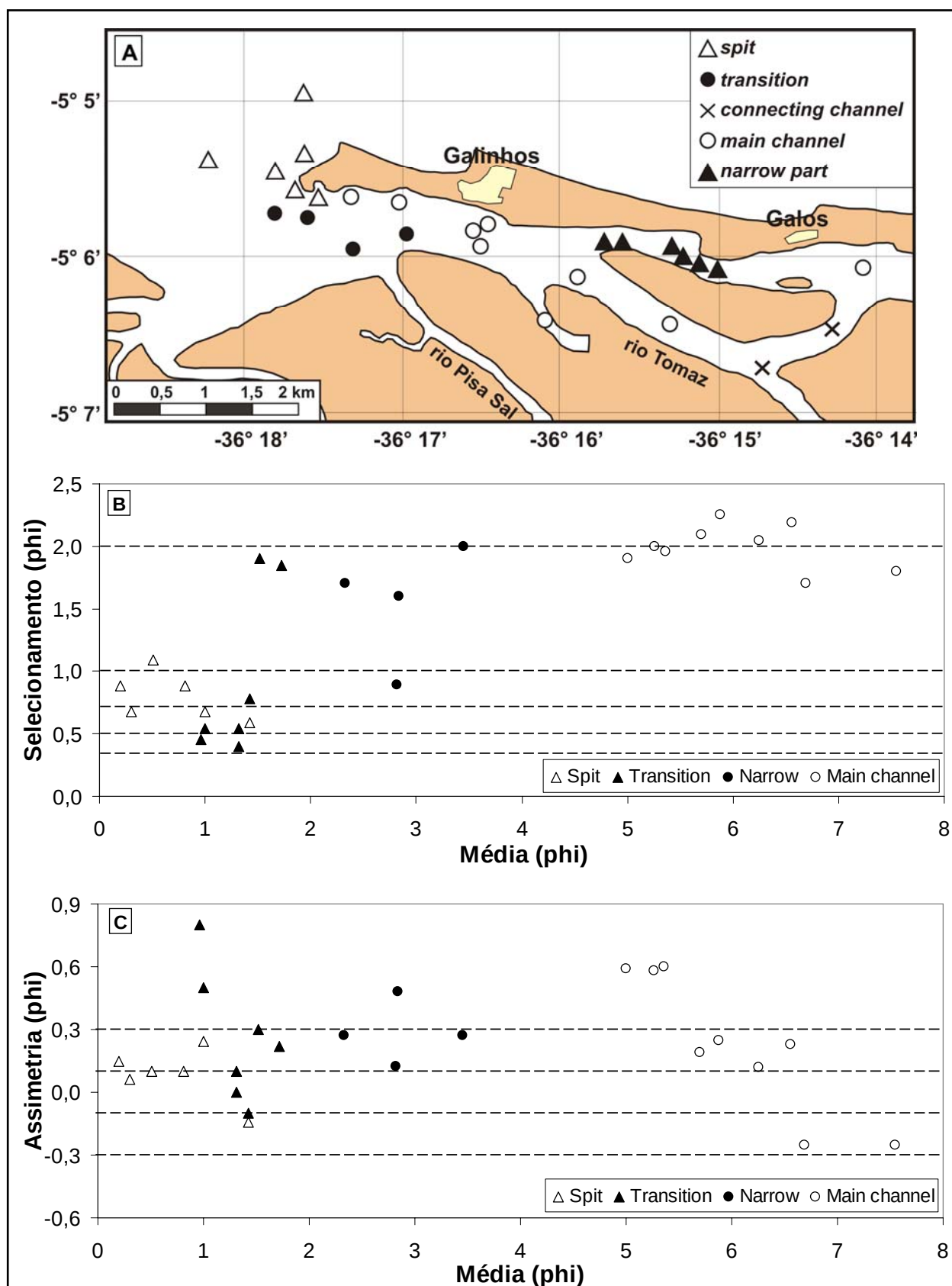


Figura 6.20. Localização das amostras de fundo (A), diagrama de dispersão bivariada (média x selecionamento) (B) e diagrama de dispersão bivariada (média x assimetria) (C) 7 que constam em Röber *et al.* 2005. As linhas tracejadas representam os limites das classes de selecionamento e assimetria (Modificado de Röber *et al.* 2005).

No geral, as fácies sedimentares mapeadas no sistema Pisa Sal e CDs são constituídas por sedimentos arenosos e lamosos de composição silicosa, com variação na quantidade de grânulo e cascalho biotriticos e no teor de carbonato. No canal do Pisa Sal, predomina areia siliciclástica (AS1b), enquanto, nos CDs, predominam lama terrígena (LL1) e marga arenosa (LL2).

As fácies mapeadas no sistema Pisa Sal (AS1a, AS1b e LL1) também foram encontradas nos CDs, entretanto outras fácies que mostram a presença da fração cascalhosa e aumento no teor de carbonato ocorrem nos CDs, tais como: AB1a, AS2b e LL2. As fácies AB1a e AS2b não são representativas da faciologia dos CDs, uma vez que apresentam apenas uma amostra cada. Assim, pode-se considerar o sistema Pisa Sal, incluindo-se os CDs, constituídos por Areia silicilástica com grânulos e cascalho (AS1a), Areia siliciclástica (AS1b), Lama terrígena (LL1) e Marga arenosa (LL2).

O estudo realizado por Santos Neto (2008), na região da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual da Ponta do Tubarão-RDSPT, localizada nos distritos de Diogo Lopes e Barreiras, município de Macau/RN, no litoral norte do estado e distando aproximadamente 22 km a oeste do município de Galinhos, onde se desenvolve esta pesquisa, mostram que a área na região da RDSPT apresenta características semelhantes à do sistema Pisa Sal, integrando um sistema de ilhas barreiras com formação de canais e deposição de sedimentos de marés, com desenvolvimento de importante cobertura de mangue.

Para a caracterização faciológica dos sedimentos de fundo, no estudo acima referido, também foi utilizada a proposta de Vital *et al* (2005, modificado de Freire *et al.*, 1997). As fácies identificadas mostraram perfeita correlação com as do canal do sistema Pisa sal, a saber: Cascalho silicibioclástico (CS2), Areia siliciclástica com grânulos e cascalhos (AS1a), Areia siliciclástica (AS1b) e Lama terrígena (LL1), apenas com a diferença da presença da fácies cascalho siliciclástico.

Da mesma forma que no sistema Pisa Sal, as fácies arenosas (AS1a e AS1b) encontram-se localizadas no centro do canal, enquanto as fácies lamosas (LL1) ocorrem nas margens (LL1). A presença da fácies CS2, provavelmente, deve-se à presença de conchas e fragmentos de conchas de moluscos, uma vez que as amostras estão localizadas próximas às margens, provavelmente em bancos com grande desenvolvimento de concheiros.

A classificação textural, o diâmetro médio das partículas e os valores de phi 50 e phi 90 dos sedimentos de fundo no centro do canal do Pisa Sal e dos CDs são

variáveis importantes para o cálculo do volume sedimentos transportados pelas correntes de marés e que será discutido no Capítulo 9 - Transporte de Sedimentos no Sistema Pisa Sal.

7 CORRENTES E PROPRIEDADES TERMOHALINAS DO SISTEMA PISA SAL

Este capítulo trata da caracterização das correntes de marés e das propriedades termohalinas no canal Pisa Sal, como forma de entender a hidrodinâmica local e propor uma classificação para o respectivo corpo aquático.

A propagação da maré em estuários, segundo Ippen & harleman (1961 *apud* Miranda *et al.*, 2002), pode ser ilustrada de forma simplificada, desde que sejam desprezados os efeitos da dissipação de energia por atrito, considerando um canal longo e seção retangular constante e desconsiderando as não linearidades. O comprimento de onda da co-oscilação da maré é maior que a profundidade dos estuários. Desta forma, o movimento dessa onda comporta-se como uma onda de gravidade longa ou de águas rasas, que, ao se propagar estuário acima (enchente), provoca o armazenamento de água no interior do estuário (prisma de maré) e a subsequente saída desse volume durante a maré de vazante.

Para efeito desse estudo, foi adotado para a co-oscilação da maré, o sistema de referência Oxyz, onde o eixo Ox relativo à componente longitudinal (u) do vetor velocidade está posicionado na desembocadura e orientado positivamente estuário abaixo, enquanto o eixo Oz está orientado no sentido oposto ao da gravidade cuja origem está sobre o fundo uniforme e constante (Figura 7.1).

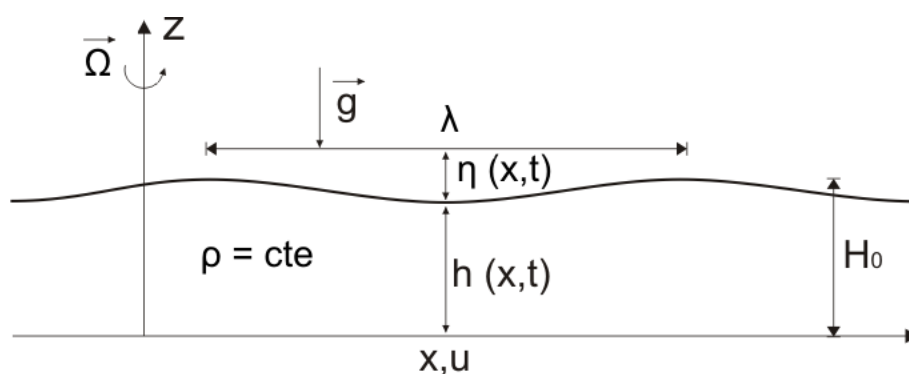


Figura 7.1. Referencial do modelo unidimensional de águas rasas de um canal [$\eta(x,t) = h(x,t) - H_0$]. O eixo longitudinal Ox está orientado estuário abaixo. $\eta(x,t)$ é a oscilação da superfície livre (maré) em relação à superfície em repouso e elevação estacionária da superfície livre, $h(x,t)$ é a variação longitudinal da profundidade local, H_0 é a altura da onda de maré e $\vec{\Omega}$ é o vetor velocidade angular da Terra (Modificado de Miranda *et al.*, 2002.).

Como os estuários não apresentam uma geometria uniforme, em que, no geral, tornam-se mais rasos e estreitos, então, a onda de maré tende a aumentar estuário acima, podendo ocorrer, simultaneamente, um decréscimo efetivo de amplitude como resultado da dissipação de energia pelo atrito (Miranda, *op cit*).

7.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS DE CORRENTE E PROPRIEDADES TERMOHALINAS

As campanhas de levantamento da intensidade e direção das correntes de marés, temperatura, salinidade, densidade no sistema Pisa Sal foram realizadas em três períodos distintos que envolveram seis estações oceanográficas fixas (E1 a E6) (Figura 7.2).

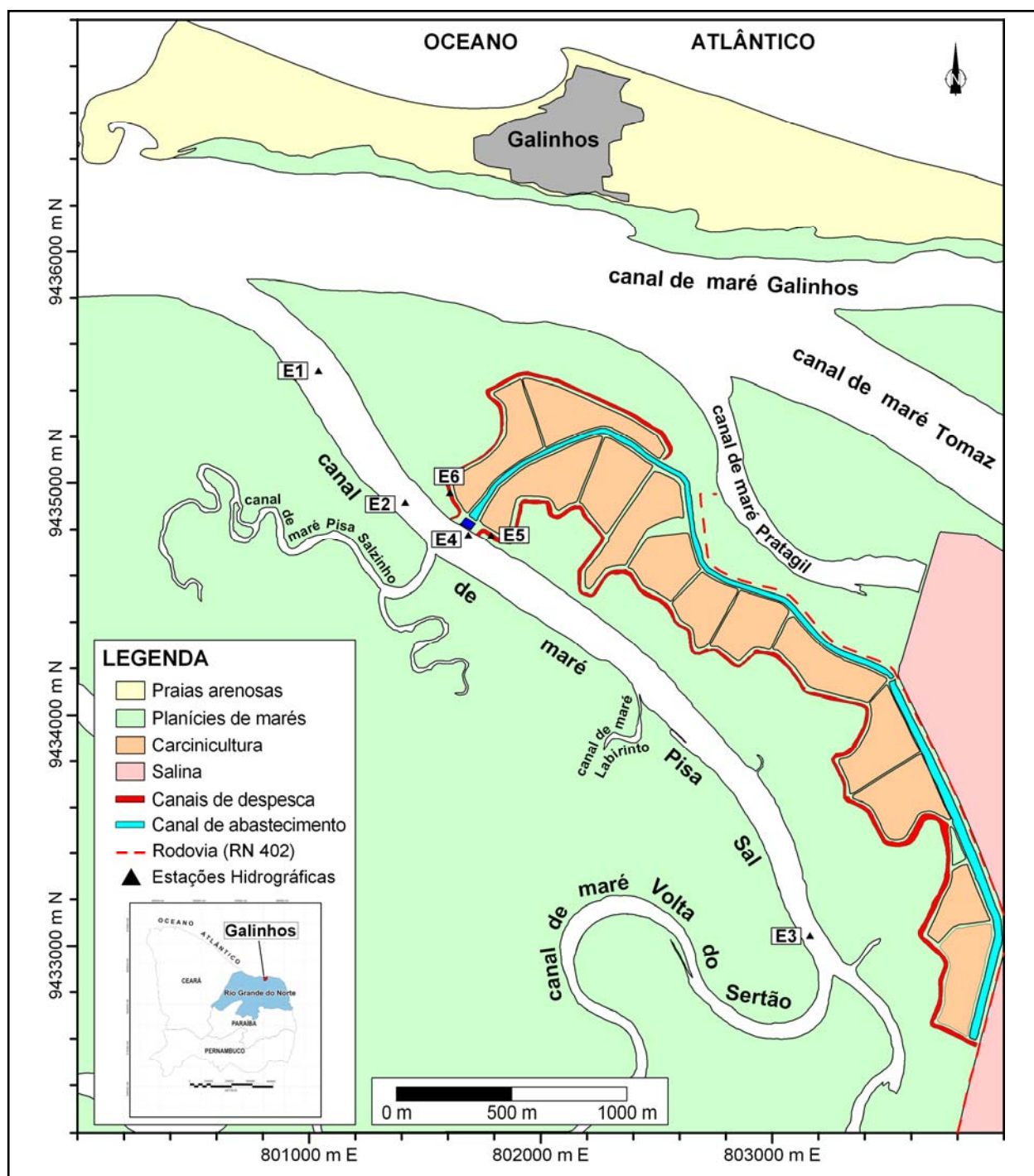


Figura 7.2. Mapa de localização das estações hidrográficas (E) no sistema Pisa Sal, Galinhos/RN.

A principal campanha de levantamento ocorreu nas estações E1, E2 e E3 (Figura 7.2) nas fases de quadratura e sizígia do período de inverno (08 a 09/06/2007 e 15 e 16/06/2007, respectivamente) e de verão (17 a 18/12/2007 e 26 a 27/12/2007, respectivamente).

O equipamento utilizado foi uma sonda da marca Valeport, modelo 108 Mk III-308 *Current Meters* que comporta um correntômetro e um CTD conjugados, operando nas frequências de pulso de 5 Hz. O correntômetro mede a velocidade em um *range* que varia de 0,03 a 5,0 m/s e direção da corrente variando de 0 a 360°. O equipamento desce na coluna d'água com apoio de um guincho oceanográfico. À sonda é acrescido um peso adicional para diminuir o arrasto e mantê-lo na vertical durante todo o levantamento (Figura 7.3). O sistema é fixado ao barco, que permanece ancorado na posição da estação, a partir da qual são registradas os perfis verticais das velocidades, salinidades, temperaturas e densidades da água durante 2 ciclos completos de maré (25 h) em intervalos de uma hora e a cada metro de profundidade. Os dados são enviados em tempo real, via cabo, para uma CDU (*Control Display Unit*) e descarregados em um *notebook*, utilizando-se software específico para essa finalidade.

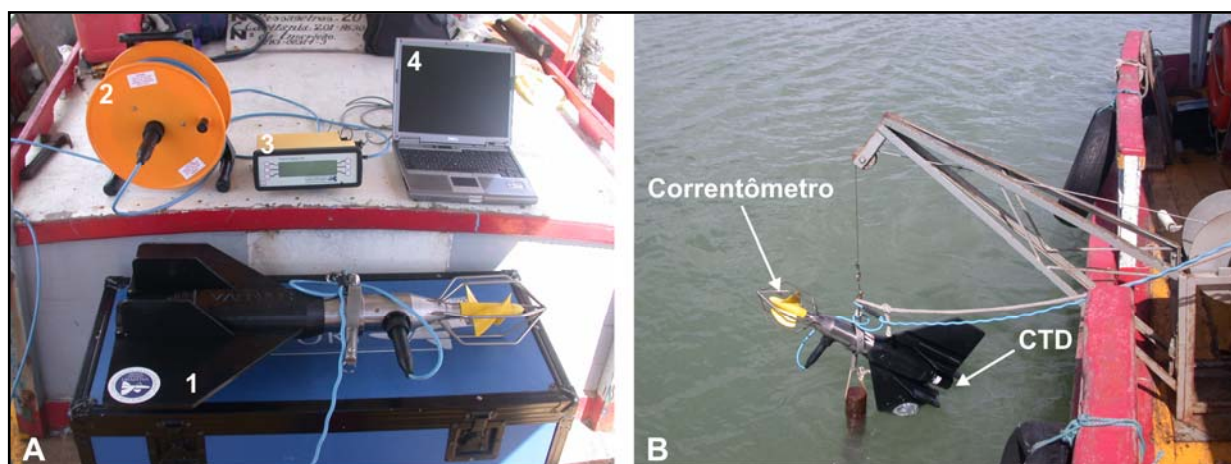


Figura 7.3. Sonda da marca Valeport, modelo 108 Mk III-308 *Current Meters* com correntômetro e CTD conjugados. A: Sonda (1), cabo de conexão (2), unidade de captura de dados-CDU (3) e notebook conectados (4). B: Sonda posicionada pelo guincho no bordo da embarcação.

Por outro lado, nas estações E4 (Pisa Sal), E5 (CD1/P3) a E6 (CD2/P2) foram realizadas somente medições da velocidade e direção das correntes de marés durante o inverno na maré de sizígia no período de 14 a 17/07/2007 (Figura 7.2). Neste levantamento, foi utilizado um sistema S4 da marca InterOcean System com sensores para correntes e temperatura, instalado a 1,05 m (E4), 1,0 m (E5) e 0,5 m (E6) do

fundo (Figura 7.4), em um período de coleta de 2 ciclos completos de maré (23,5 a 26 horas), com uma contagem média de 2 amostras/segundo, tempo do ciclo de 30 minutos e registro durante os primeiros 15 minutos, totalizando dois grupos de dados a cada hora. O sistema S4 opera por indução eletromagnética numa frequência de 2 Hz. A faixa de detecção da velocidade da corrente é de 0 a 350 cm/s e acurácia $\pm 1,0$ cm/s (2% de leitura). A leitura da direção da corrente é realizada em relação ao Norte magnético, utilizando-se uma bússola *flux-gate* com resolução de 0,5 graus.



Figura 7.4. Bóia S4 mostrando os sensores para determinação dos parâmetros da corrente (círculos cinza) (A), bóias (branca) para estabilização e verticalização da S4 (B) e peso para fixação da bóia no fundo do canal (C).

7.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS DE CORRENTE E PROPRIEDADES TERMOHALINAS

Os ângulos fornecidos pelos correntômetros para indicar a direção e sentido da corrente são em relação ao Norte magnético, entretanto, em ambiente estuarino, utiliza-se os componentes longitudinal, u , e transversal, v , e o vetor velocidade $\vec{V}$. Essas componentes podem ser adquiridas a partir das equações 7.1 e 7.2. Valores positivos de u indicam sentido estuário abaixo, enquanto e valores negativos indicam sentido estuário acima.

$$u = V \cos \theta \dots\dots\dots 7.1$$

e

$$v = V \sin \theta \dots\dots\dots 7.2$$

Nas equações acima, V é o módulo do vetor e θ é o ângulo medido no sentido anti-horário formado entre o vetor e o eixo das abscissas (David e Kjerfve, 1998), com orientação segundo o ângulo γ em relação ao Norte verdadeiro (Miranda *et al.*, 2002). Para essa decomposição, o argumento θ é definido pela equação 7.3:

$$\theta = 90^\circ - (dd \pm D) \pm \gamma \dots\dots\dots 7.3$$

onde dd é a direção da velocidade medida pelo instrumento em relação ao Norte magnético, D é a declinação magnética para a área, tomando como referência a declinação da estação E1 ($21,65^\circ$ W = $-21,65^\circ$, obtida *on line* a partir do *site* do *National Geophysical Data Center-NGDC* do NOAA Satellite and Information Service) e γ é o ângulo de rotação horária (+) ou anti-horária (-) para que o eixo x se oriente longitudinalmente ao eixo do canal (Tabela 7.1).

Tabela 7.1. Coordenadas UTM, declinação magnética (D), ângulo de rotação das estações oceanográficas (γ) e a profundidade média (P_{med}).

EST.	UTM E	UTM N	D	γ	P_{med}
	km E	km N	grau	grau	m
E1	801040	9435484	-21,65	-123	3,87
E2	801415	9434918		-143	3,54
E3	803163	9433046		-124	3,78
E4	801688	9434776		-149	2,49
E5	801786	9434775		-152	1,63
E6	801608	9434959		+68	1,33

Para o processamento e análise de dados para obtenção de parâmetros correntográficos e das propriedades termohalinas do canal, foi utilizado o programa ESTUÁRIO, executado em ambiente MatLab, adaptado por Bérnago (2001) ao programa DINEST, desenvolvido por Marco A. Correa. A figura 7.5 apresenta o fluxograma das principais rotinas do programa ESTUÁRIO.

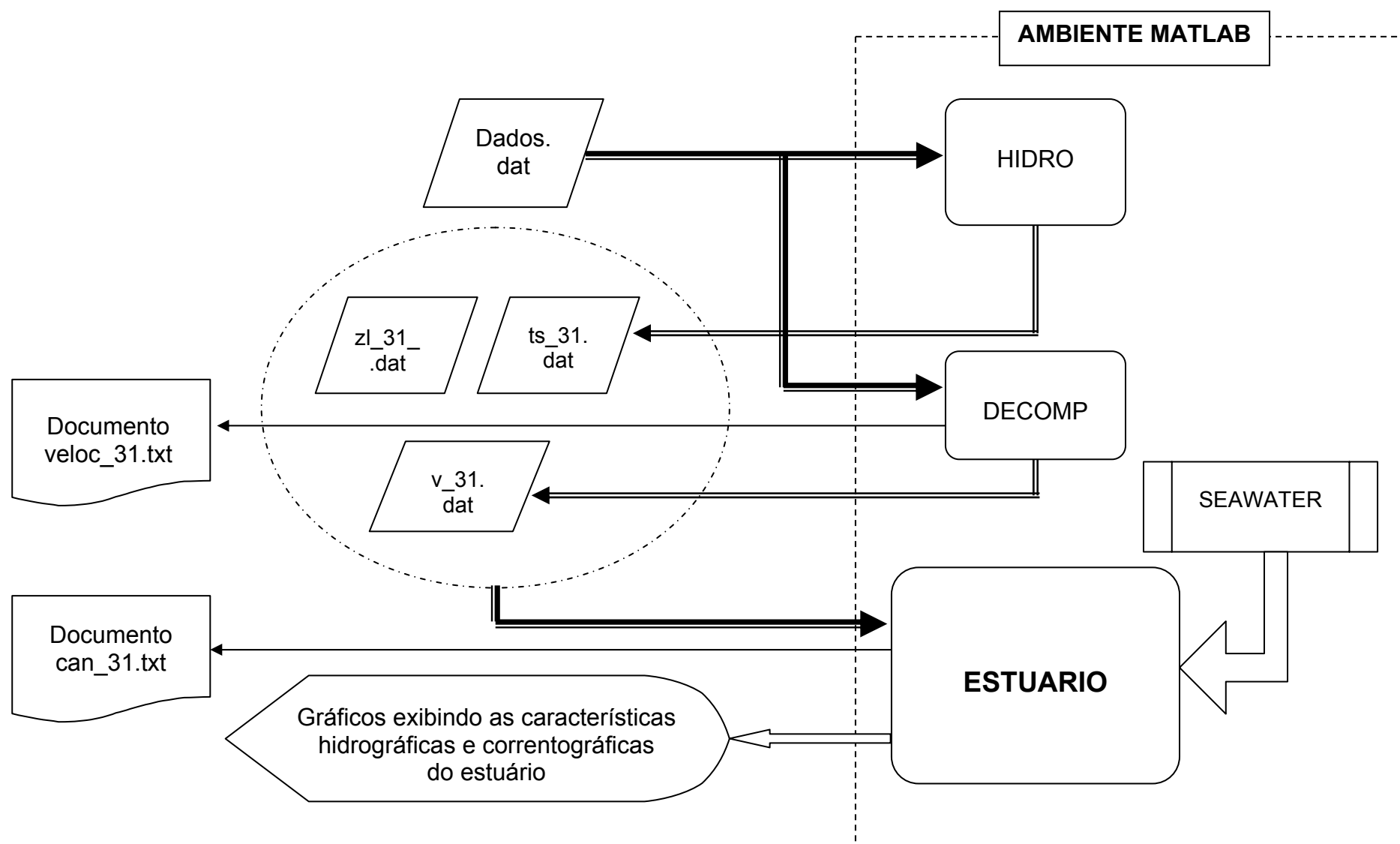


Figura 7.5. Fluxograma com as principais rotinas MatLab utilizadas no programa Estuário para obtenção de parâmetros hidrográficos e correntográficos de estuários (da Silva, 2005).

A entrada de dados ocorre a partir de um arquivo matriz DADOS.dat que consiste de amostragem horária e a cada metro de profundidade, durante 2 ciclos consecutivos de maré (25 horas) dos seguintes dados hidrográficos: hora, profundidade, salinidade, temperatura, densidade, intensidade e direção da corrente.

O programa HIDRO gera e organiza todos os parâmetros nas estações em relação à profundidade para os ciclos consecutivos de maré e também realiza o controle de qualidade dos dados de entrada, interpolando-os em 11 níveis ao longo da coluna d'água pelo método *cubic spline*. Os arquivos de saída nos quais são gravadas as edições finais das séries temporais, no formato de entrada do próximo processamento, são designados por ts_31.dat (informações sobre hora, profundidade adimensional, temperatura, salinidade e sigma-t) e zl_31.dat (espessura da coluna d'água).

A decomposição do vetor velocidade nas componentes u e v é realizada pelo programa DECOMP que gera o arquivo v_31.dat (estações organizadas para os ciclos consecutivos de maré) e apresenta as seguintes saídas gráficas: variação temporal dos perfis verticais, $u(t)$, perfil médio no tempo $\langle u(Z) \rangle$ e a velocidade residual, u_a .

Para calcular o perfil médio temporal (2 ciclos completos de maré) da componente u para cada profundidade adimensional Z foi utilizada a equação 7.4 descrita em Miranda *et al.* (2002):

$$\langle u(Z_j) \rangle = \frac{1}{n} \left[\frac{u(Z_j, t_0)}{2} + \sum_k u(Z_j, t_k) + \frac{u(Z_j, t_n)}{2} \right] \dots\dots\dots 7.4$$

onde: Z_j é a profundidade adimensional (0,0; 0,1; 0,2;...;1,0), t é o tempo em intervalos constantes (t_0 a t_n), $k = 1, 2, \dots, n-1$.

A velocidade residual u_a foi determinada pela média do tempo integrada na coluna d'água, uma vez que a descarga fluvial é inexistente.

Na determinação de perfis verticais médios de velocidade e das propriedades termohalinas (temperatura, salinidade e densidade) em ambiente sob influência da maré, a profundidade local varia com a posição e o tempo. Com isso, as flutuações da coluna d'água durante o levantamento fazem com que as medidas sejam realizadas em diferentes níveis abaixo da superfície livre, causando distorções nas profundidades de amostragem (Miranda *et al.*, 2002). Para corrigir estas distorções, as profundidades

de amostragem, z foram convertidas, pelo próprio programa, em profundidades adimensionais $Z = z/h(t)$, onde $h(t)$ é a profundidade da água no momento da amostragem. A profundidade adimensional, Z , varia de 0 a -1, indicando a superfície livre e o fundo, respectivamente. Para efeito de cálculo das correntes, usou-se a condição de atrito máximo no fundo onde a componente vertical da corrente é zero.

Por fim, os arquivos `ts_31.dat`, `zl_31.dat` e `v_31.dat`, além do número de estações e de níveis ao longo da coluna d'água, são carregados no programa ESTUARIO, o qual tem a função de processar um ciclo completo de maré (semidiurna ou diurna), usando, para isso, o pacote auxiliar de subrotinas do aplicativo MATLAB denominado SEAWATER.

Para obtenção das características da maré na área de estudo, utilizou-se os dados de maré da tábua de maré da DHN-Marinha do Brasil para o porto de Guamaré (05° 06',3 S e 036°19',1 W), que utiliza 18 componentes e localiza-se no interior do complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré, a aproximadamente 3,5 km a Oeste do sistema Pisa Sal. O nível médio da maré indicado na carta náutica é de 140,94 cm.

A maré da área de estudo foi classificada com base nas amplitudes das constantes harmônicas de maré (O_1 , K_1 , M_2 e S_2) calculadas conforme Franco (2000) para o porto de Guamaré/RN (Marinha do Brasil/DHN) e aplicadas à equação 7.5 que define o Número de Forma de Maré (N_f), segundo Courtier (1938 *apud* Franco, *op cit.*) como:

$$N_f = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \dots\dots\dots 7.5$$

onde: $K_1 = 2,72$ cm; $O_1 = 3,9$ cm; $M_2 = 86,25$ cm e $S_2 = 27,88$ cm, são as componentes de maré para a região. Dessa forma, encontra-se que $N_f = 0,06$.

De acordo com Courtier (*op cit*), as marés que apresentam a relação $0 < N_f < 0,25$, são classificadas como do tipo semidiurna. Este valor N_f está de acordo com aquele determinado por Riedel (2000) e da Silva *et al.* (2006).

A figura 7.6 apresenta o comportamento da co-oscilação das marés, segundo a tábua de marés do porto de Guamaré, DHN, durante a realização deste trabalho.

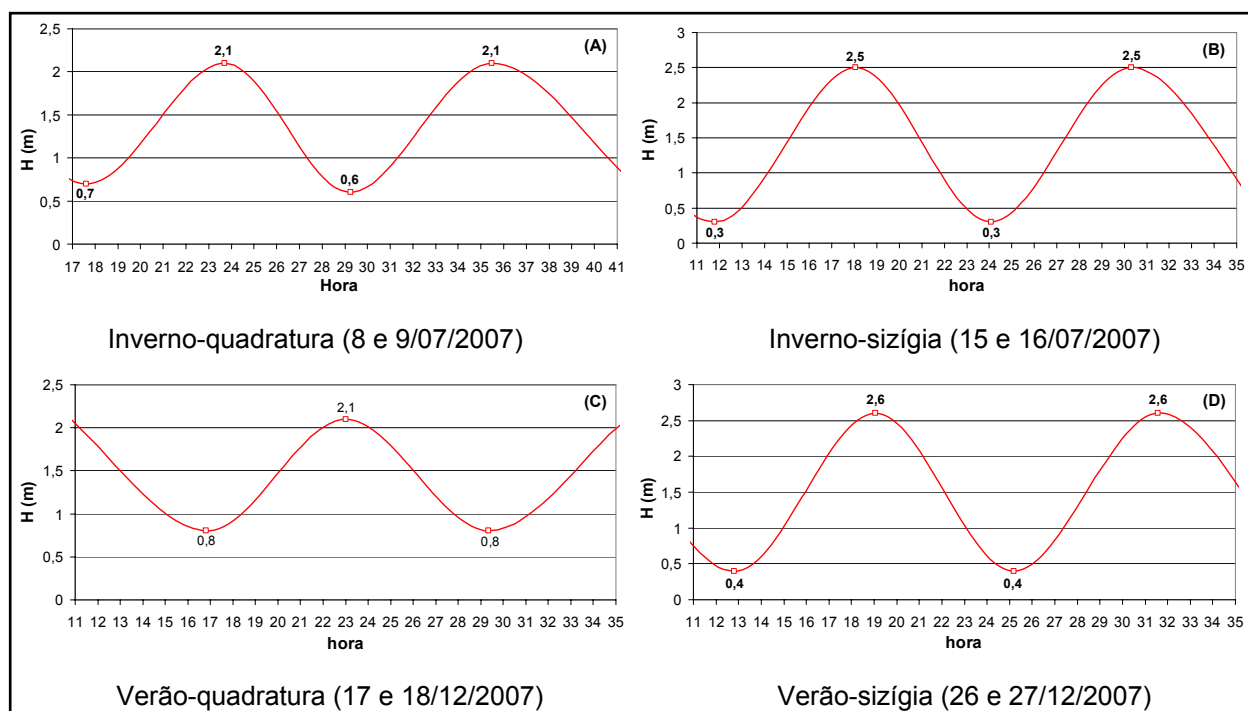


Figura 7.6. Co-oscilação da maré para dois ciclos consecutivos (25 h) nos períodos de inverno-quadratura (A), inverno-sizígia (B), verão-quadratura (C) e verão-sizígia (D) extraídas da tábua de maré da DHN/Marinha do Brasil do porto de Guamaré/RN.

Para apresentação dos dados de velocidade e direção das correntes, são utilizados gráficos, mostrando perfis temporais, perfis verticais médios, gráficos de isopletas da componente u , além de rosetas com as direções das correntes em relação ao Norte verdadeiro. A componente v não foi utilizada, uma vez que o transporte de sedimentos ocorre longitudinalmente ao canal. As velocidades médias da componente u nas marés de enchente e vazante, para cada período estudado, foram determinadas a partir das velocidades geradas pelo programa ESTUÁRIO.

A influência do vento não foi considerada devido às pequenas dimensões do canal.

7.3 ANÁLISE DOS DADOS DE CORRENTE

Os resultados obtidos das correntes de marés do sistema Pisa Sal serão apresentados, consecutivamente, para os períodos de inverno e verão, referente às fases de quadratura e sizígia e às marés de enchente e vazante. Também serão apresentados resultados obtidos das correntes que atuam nos canais de despesca (CDs) da empresa Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda. somente no período de inverno.

7.3.1 Sistema Pisa Sal

7.3.1.1 Inverno

A componente u da velocidade das correntes no canal do Pisa Sal na quadratura mostra grande variabilidade temporal e caráter fracamente assimétrico, com gradiente vertical relativamente pequeno, exceto em momentos após as estofas de enchente e de vazante. Durante a sizígia, apresenta-se simétrico na estação E1, aproximadamente simétrico na E2 e fracamente assimétrico na E3, com velocidades de vazante maiores que as de enchente (Figura 7.7).

As velocidades durante a maré de vazante de quadratura são maiores que as de enchente ao longo de todo canal, como registrado nas estações E1 a E3 (Figura 7.7). As velocidades médias de vazante variam entre 0,21 e 0,23 m/s e as médias de enchente variam de 0,16 a 0,18 m/s, as quais diminuem estuário acima (Tabela 7.2). Na sizígia, o perfil temporal da velocidade média na vazante aumenta estuário acima com valores variando de 0,36 a 0,41 m/s, enquanto a média na enchente diminui estuário acima com valores entre 0,28 e 0,32 m/s (Tabela 7.2).

Tabela 7.2. Velocidades máxima ($u_{\max}$), média ($\bar{u}$), mínima ($u_{\min}$) da componente u das correntes de marés durante o inverno e verão nas marés de quadratura (qd) e sizígia (sz) e nas fases de vazante e enchente nas estações fixas ao longo do canal do Pisa Sal, Galinhos/RN.

ÉPOCA	EST.	MARÉ	Vazante			Enchente		
			$u_{\max}$	$\bar{u}$	$u_{\min}$	$u_{\max}$	$\bar{u}$	$u_{\min}$
			m/s					
Inverno	E1	qd	0,67	0,23	0,00	0,44	0,18	0,00
		sz	0,97	0,36	0,00	1,21	0,32	0,00
	E2	qd	0,61	0,23	0,00	0,40	0,16	0,00
		sz	0,85	0,37	0,00	0,77	0,31	0,00
	E3	qd	0,65	0,21	0,00	0,56	0,16	0,00
		sz	1,11	0,41	0,00	0,76	0,28	0,01
Verão	E1	qd	0,46	0,19	0,00	0,37	0,17	0,00
		sz	0,78	0,35	0,01	0,79	0,31	0,02
	E2	qd	0,46	0,19	0,00	0,37	0,16	0,00
		sz	1,21	0,33	0,01	0,60	0,28	0,01
	E3	qd	0,49	0,19	0,00	0,37	0,16	0,00
		sz	1,07	0,34	0,00	0,66	0,30	0,01

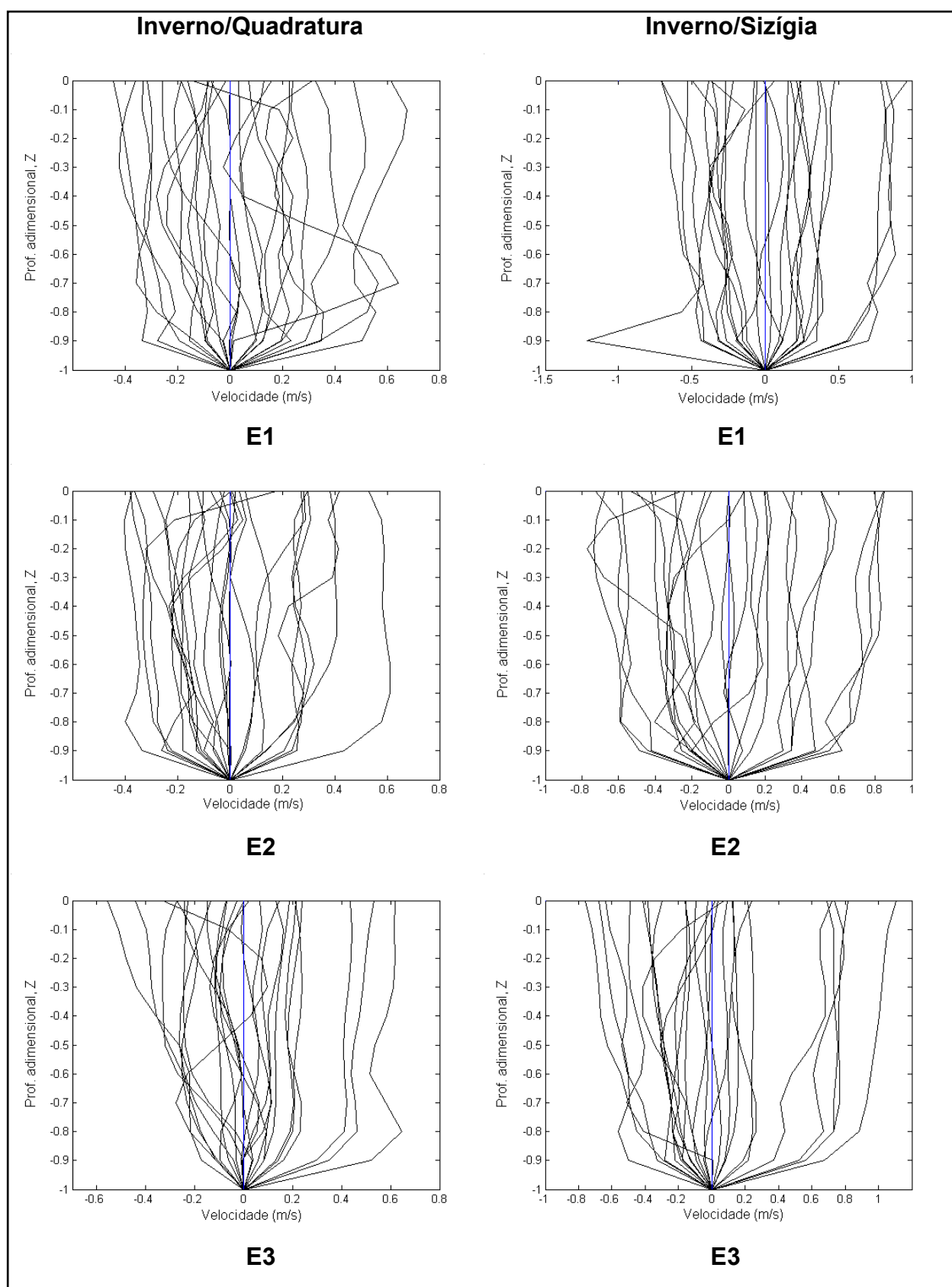


Figura 7.7. Variação temporal dos perfis da componente longitudinal da velocidade (u) no canal do Pisa Sal medidas nas estações E1 a E3 durante a maré de quadratura e sizígia no período do inverno. Velocidades positivas e negativas referem-se às marés de vazante e enchente, respectivamente.

A velocidade máxima de vazante na quadratura é de 0,67 m/s (E1), enquanto a velocidade máxima de enchente é de 0,56 m/s (E3). As correntes médias de vazante e enchente nas três estações apresentam velocidades homogêneas com variações na ordem de 0,02 a 0,04 m/s, respectivamente. Na sizígia, a velocidade máxima de vazante é de 1,11 m/s (E3) e a de enchente é de 1,21 m/s (E1). A variabilidade entre as médias máximas é de 0,05 m/s e 0,04 m/s (Figura 7.7 e Tabela 7.2).

A componente longitudinal u de vazante orienta-se, preferencialmente, nas direções NW e NNW (0,1 a 0,7 m/s) enquanto as correntes de enchente orientam-se para SE (0,1 a 0,5 m/s) e SSE (0,5 a 0,7 m/s). Da mesma forma, as correntes de sizígia coincidem com as da maré de quadratura (NW-NNW e SE-SSE), entretanto mostram variação na intensidade relativa. Nas correntes de vazante, predominam velocidades de 0,1 m/s a 0,7 m/s. As maiores velocidades (0,7 m/s) aumentam estuário acima, chegando em torno de 20 % na estação E3. Por sua vez, as correntes de enchente mostram predominância de velocidades entre 0,3 e 0,7 m/s, (Figura 7.8).

A co-oscilação da maré durante a quadratura ocorre em escalas temporais distintas, a saber: a vazante e enchente, na desembocadura, ocorrem em períodos de 5,5 e 6,5 horas, respectivamente. Nas estações E2 e E3, esses períodos são respectivamente de 4,75 e 7,25 horas e de 5,25 e 7,0 horas (Figura 7.9). Durante a sizígia, a co-oscilação da maré na estação E1 ocorre em períodos de 5,35 e 5,45 horas para a vazante e enchente, respectivamente, enquanto, na estação E2, ocorrem regularmente a cada 6,0 horas. Entretanto, na região de cabeceira, a vazante tem duração aproximada de 4,75 horas e a enchente de 7,5 horas (Figura 7.9).

Com relação à co-oscilação da maré, as velocidades máximas na quadratura mostram variações temporais, longitudinais e verticais. Na boca do canal (E1), as velocidades máximas ocorrem 4,0 e 1,5 horas após as estofas de vazante e enchente, respectivamente. Na E2, essas velocidades ocorrem 3,5 horas e 1,0 a 1,75 horas após as estofas de vazante e enchente, enquanto, na E3, ocorrem 5,0 a 6,0 horas e 1,0 a 1,25 horas após as estofas de vazante e enchente (Figura 7.9). As máximas durante a sizígia ocorrem da superfície até aproximadamente a profundidade de 0,5 (Z). Na estação E1, as velocidades máximas ocorrem entre 3,0 e 5,0 horas e 1,33 horas após as estofas de vazante e enchente, respectivamente. Na estação E2, essas velocidades ocorrem em torno de 4,0 e 2,0 horas após as estofas de vazante e enchente, enquanto, na E3, ocorrem 6,0 horas e 1,0 a 1,75 horas após as estofas anteriormente mencionadas (Figura 7.9).

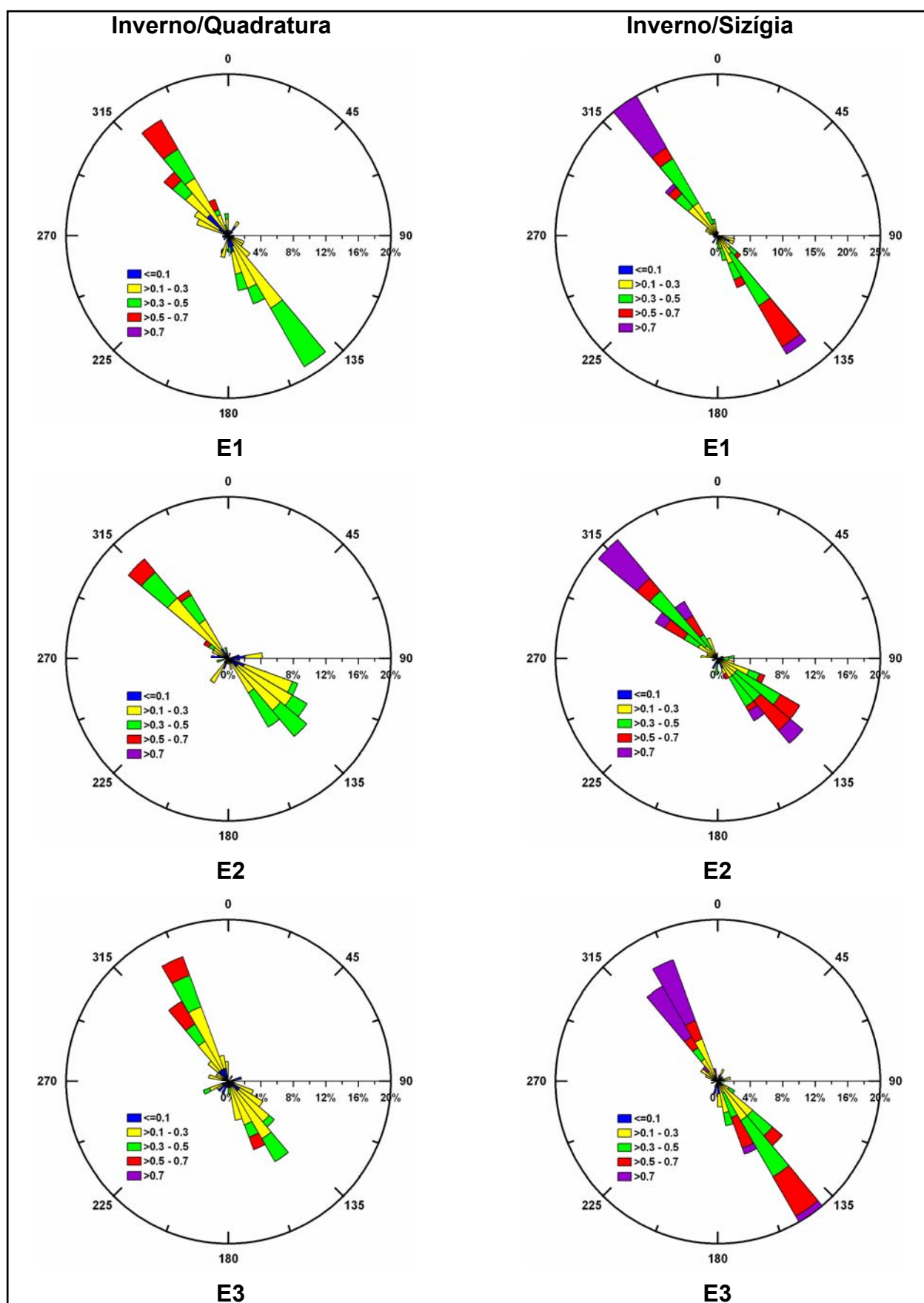


Figura 7.8. Direções da componente longitudinal da corrente (u) no canal do Pisa Sal medidas nas estações E1 a E3 durante a maré de quadratura e sizígia no período do inverno. As velocidades estão em m/s.

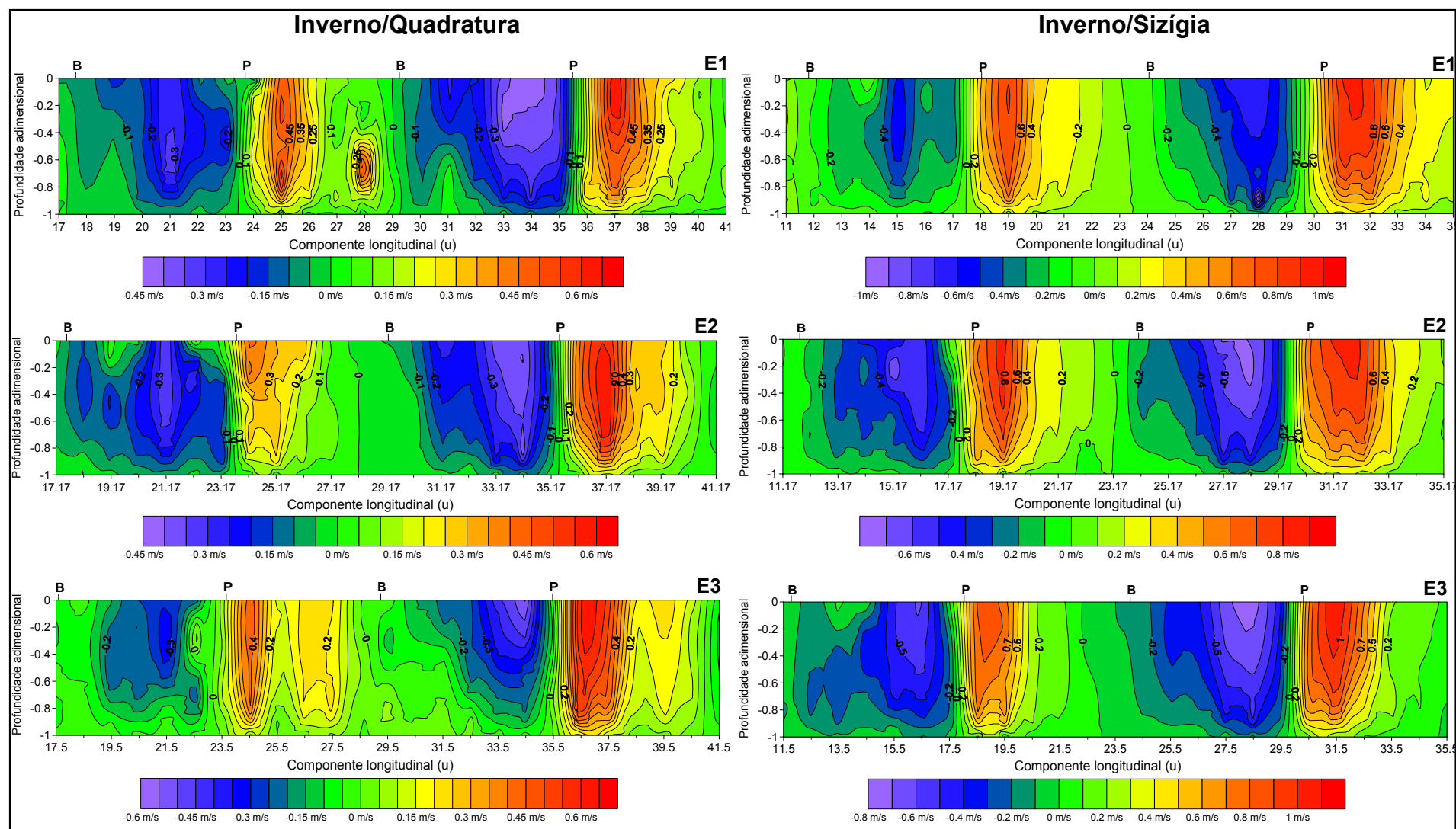


Figura 7.9. Isopletas da componente longitudinal u da velocidade da corrente de maré no canal do Pisa Sal nas estações E1 a E3 durante a maré de quadratura no período de inverno. O eixo das abscissas representa a escala temporal (hora decimal) no período de 8 a 9/07/2007. Velocidades positivas e negativas referem-se, respectivamente, às marés de vazante e enchente. As letras B e P referem-se às estofas de baixa-mar e preamar (DHN), respectivamente.

De forma geral, a variação vertical da velocidade na quadratura mostra valores mais elevados da superfície até à metade da profundidade Z , diminuindo em direção ao fundo, seja durante a vazante ou enchente. Na proximidade das estofas, a velocidade é constante em toda coluna d'água. Durante a sizígia, a componente u mostra boa variação vertical com velocidades que diminuem em direção ao fundo e com gradiente relativamente pequeno. Em momentos antes e após as estofas, o gradiente vertical é nulo, indicando velocidades constantes em toda coluna d'água (Figura 7.9).

A média temporal da componente u (quadratura) em relação à profundidade adimensional (Z) mostra, na desembocadura e na cabeceira, velocidades próximas de zero na camada entre a superfície e $-0,4 Z$. Abaixo dessa profundidade até o fundo, a média temporal predominante nas estações E1 e E2 é de vazante e atingem as velocidades de $0,07 \text{ m/s}$ e $0,063 \text{ m/s}$, respectivamente. Na estação E3, o perfil mostra velocidades no sentido da enchente e vazante. Na região da desembocadura e da cabeceira do canal, a velocidade residual (u_a) é de $0,02 \text{ m/s}$ e indica movimento predominante na direção da vazante, enquanto, na estação intermediária, essa velocidade é igual a zero (Figura 7.10). Durante a sizígia, o perfil médio temporal da componente u mostra grande variabilidade na desembocadura e na porção intermediária do canal e uma bidirecionalidade na cabeceira. A estação E1 apresenta velocidades médias máximas de vazante nas profundidades $-0,1$ e $-0,7$, ocorrendo inversão para enchente na camada de fundo (Figura 7.10). Na estação E2, a coluna d'água está separada em cinco camadas de velocidades: três na direção canal abaixo nas profundidades $-0,1$, $-0,5$ e $-0,9$, e duas canal acima nas profundidades $-0,3$ e $-0,8$. O perfil médio da velocidade na estação E3 localiza-se no domínio da enchente, com velocidade na superfície de $0,035 \text{ m/s}$ e duas camadas nas profundidades $-0,4 Z$ e $-0,9 Z$ (Figura 7.10). Desta forma, a velocidade residual na desembocadura e cabeceira apresenta tendência na direção da vazante com valor de $0,02 \text{ m/s}$, enquanto, na estação intermediária (E2), a velocidade residual é nula (Figura 7.10).

7.3.1.2 Verão

A variação temporal da componente u na quadratura define um comportamento simétrico na desembocadura e aproximadamente simétrico na porção intermediária, enquanto, na cabeceira, é fracamente assimétrico, com as velocidades de vazante mais elevadas, porém mostram médias constantes ao longo do canal (Figura 7.11).

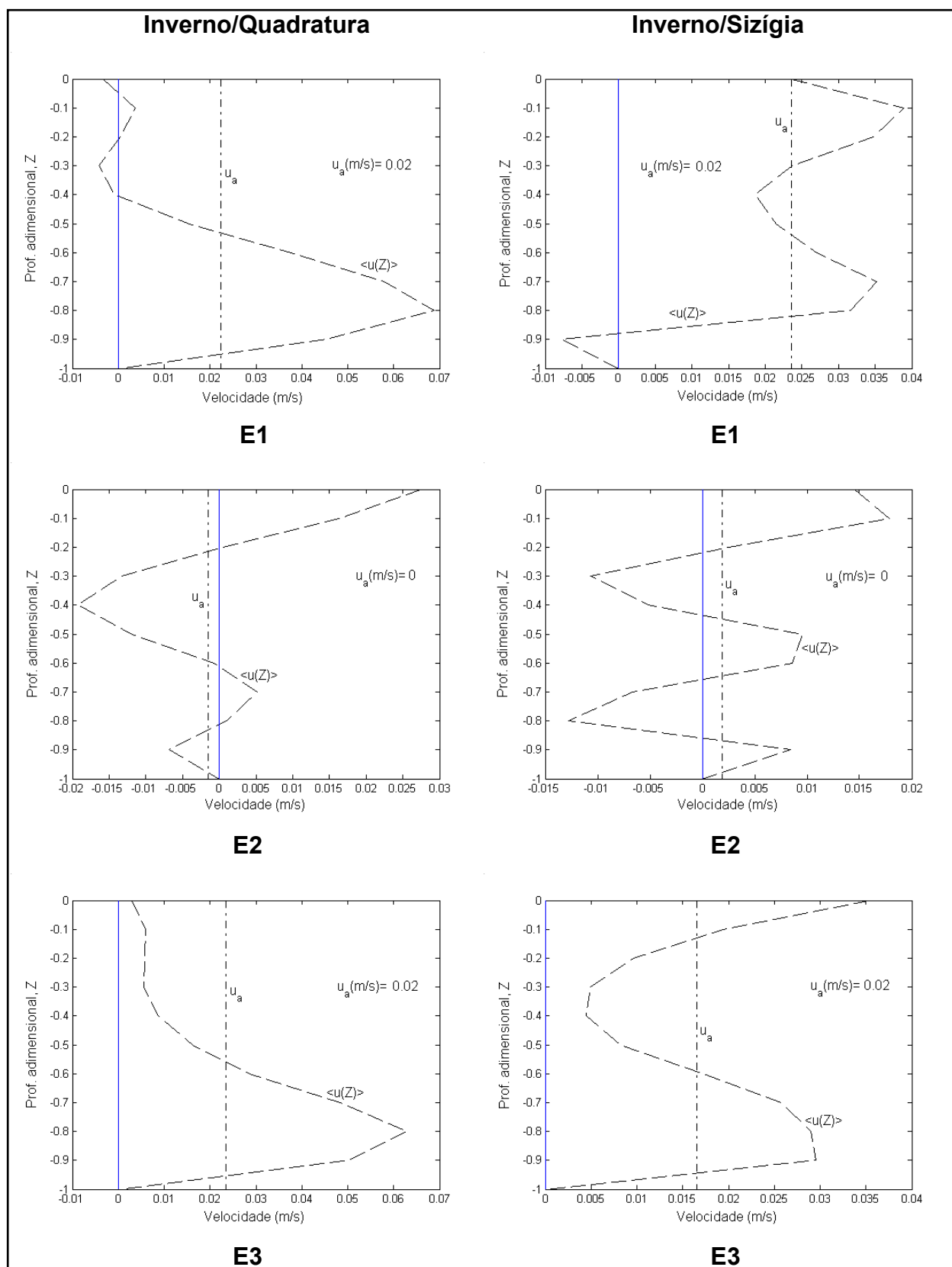


Figura 7.10. Perfil médio temporal da componente longitudinal da velocidade $\langle u(Z) \rangle$ (linha tracejada) e velocidade residual (u_a) (linha traço-ponto) no canal do Pisa Sal medidas nas estações E1 a E3 na maré de quadratura e sizígia no período de inverno.

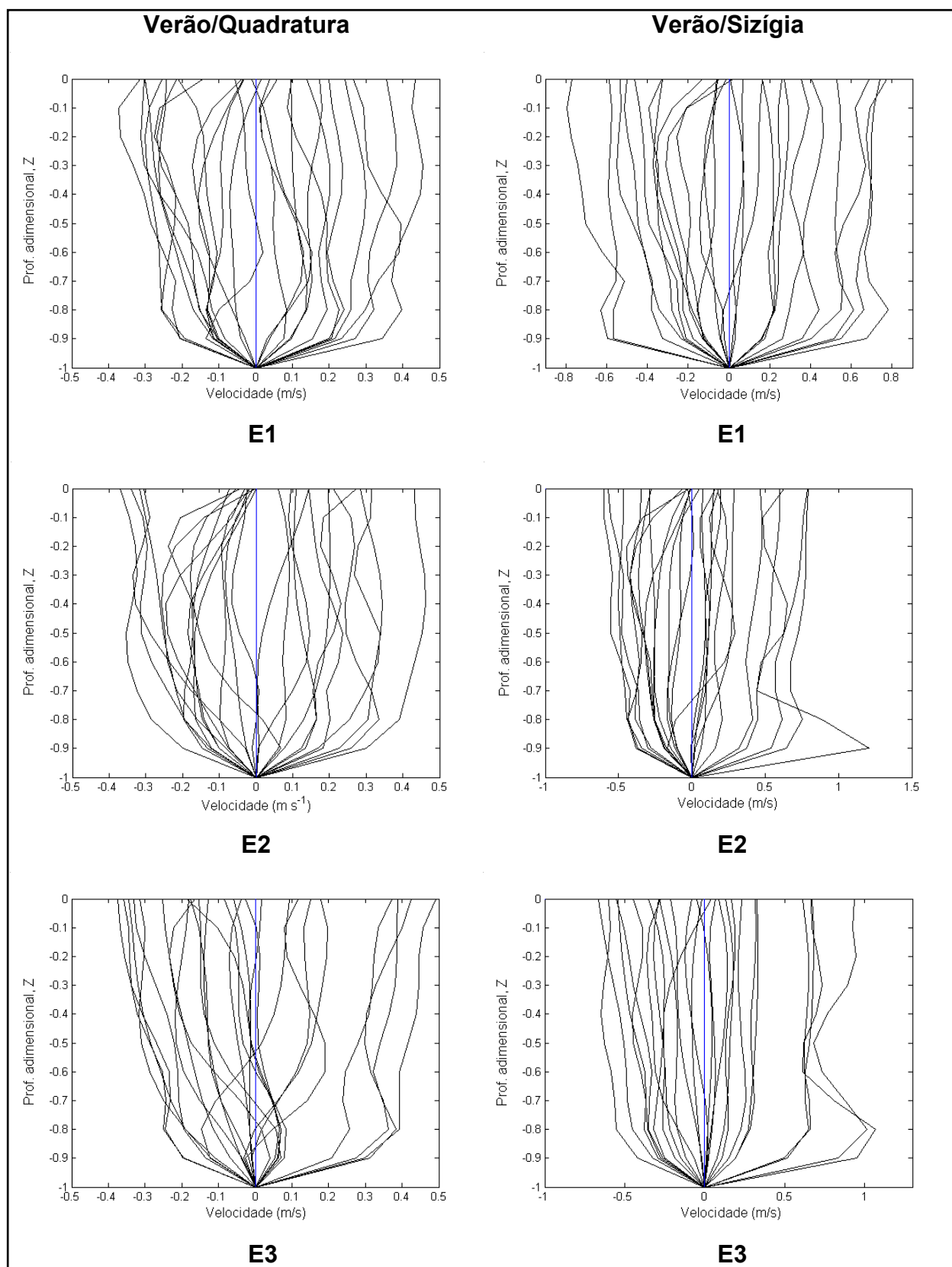


Figura 7.11. Variação temporal dos perfis da componente longitudinal da velocidade (u) no canal do Pisa Sal medidas nas estações E1 a E3 durante a maré de quadratura no período do verão. Velocidades positivas e negativas referem-se às marés de vazante e enchente, respectivamente.

A velocidade máxima de vazante ocorre na cabeceira (0,49 m/s), enquanto na enchente é constante ao longo de todo canal (0,37 m/s) (Tabela 7.2). Durante a sizígia, a cabeceira do canal mostra configuração simétrica da velocidade, enquanto, na porção intermediária e desembocadura, apresentam-se aproximadamente simétricas (Figura 7.11). As velocidades de vazante são maiores que as de enchente, com variações relativas entre 0,03 e 0,05 m/s. A velocidade máxima é encontrada na porção intermediária (1,21 m/s) (Tabela 7.2).

As direções da componente u de vazante e enchente na quadratura são, predominantemente, para NW-NNW e SE-SSE. Nas correntes de vazante, predominam velocidades $> 0,1$ m/s até $> 0,5$ m/s. Na sizígia, as direções das correntes de vazante e enchente são, respectivamente, NW-NNW e SE-SSE. Durante a vazante, as velocidades variam de 0,3 a 0,7 m/s (Figura 7.12)

Isopletras da componente u de quadratura mostram padrões bem definidos e concordantes com as fases da maré. Próximo à estufa de enchente, as isolinhas apresentam gradientes constantes. Entretanto, na cabeceira do canal, a maré de enchente apresenta configuração irregular, com um pequeno núcleo de velocidade em torno de -0,10 m/s. Nas marés de sizígia, a componente u mostra padrão bem definido e homogêneo ao longo do perfil temporal, representando bem a co-oscilação da maré. Próximo às estofas de enchente, as velocidades apresentam gradientes constantes (Figura 7.13).

Os períodos da co-oscilação da maré ao longo do canal, durante a maré de quadratura, apresentam comportamentos distintos. Na desembocadura, as estofas ocorrem em um intervalo de tempo constante de 6,0 horas. O mesmo não ocorre na porção intermediária e de cabeceira. Na porção intermediária, a vazante e a enchente ocorrem em 6,45 e 5,45 horas e, na cabeceira, ocorrem em 5,15 e 7,0 horas, respectivamente. Nas marés de sizígia, as fases de vazante e enchente ocorrem em intervalos de tempo aproximadamente semelhantes. O comportamento da vazante, nas três estações canal acima, apresenta os seguintes tempos de ocorrência: 6,5 horas, 5,75 horas e 6,0 horas. Por sua vez, a enchente apresenta os seguintes tempos: 5,83 a 6,75 horas (média 6,29 horas), 6,0 a 6,5 horas (média 6,25 horas) e 6,5 a 6,75 horas (média 6,63 horas) (Figura 7.13).

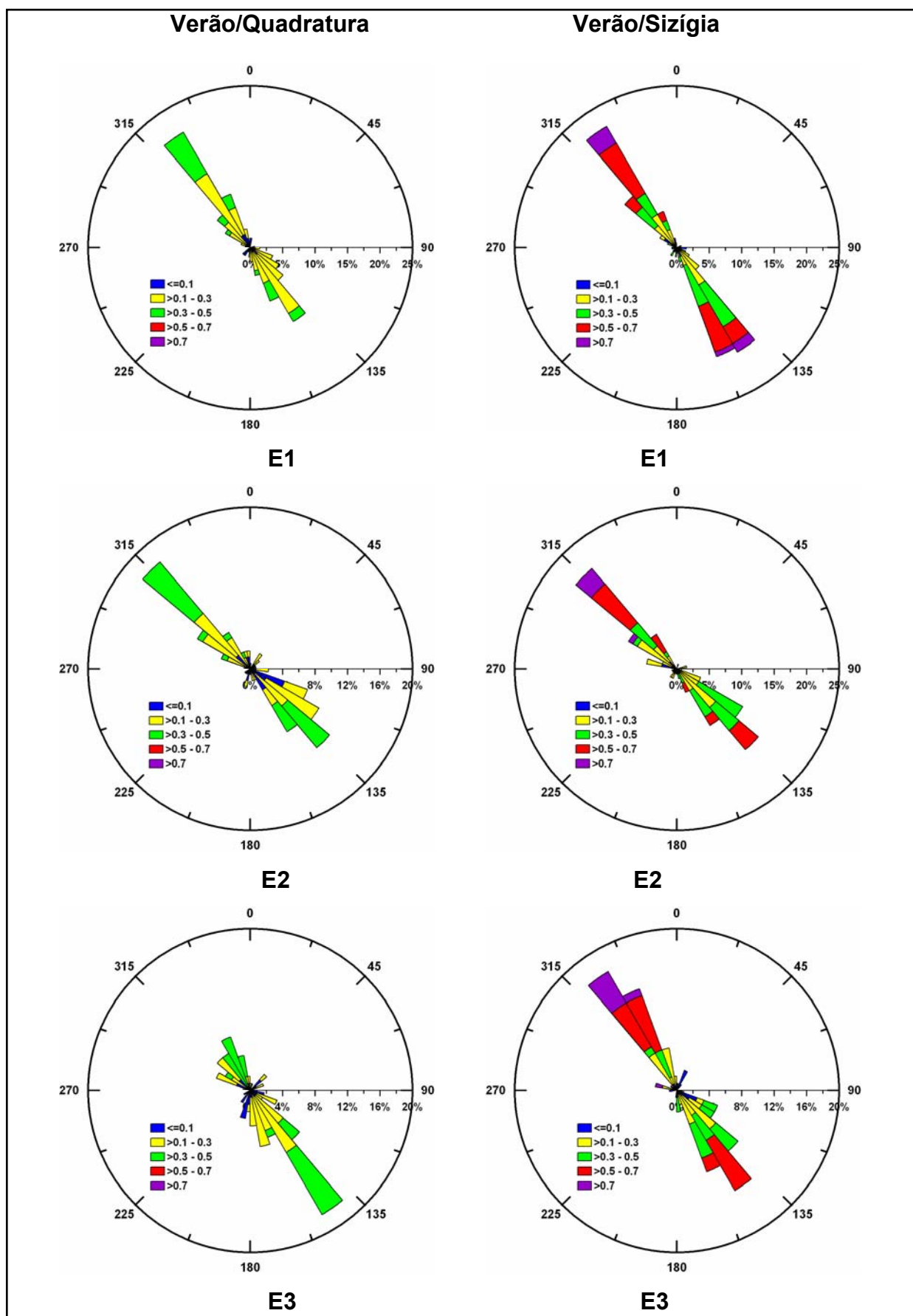


Figura 7.12. Direções da componente longitudinal da corrente (u) no canal do Pisa Sal medidas nas estações E1 a E3 durante a maré quadratura no período do verão. As velocidades estão em m/s.

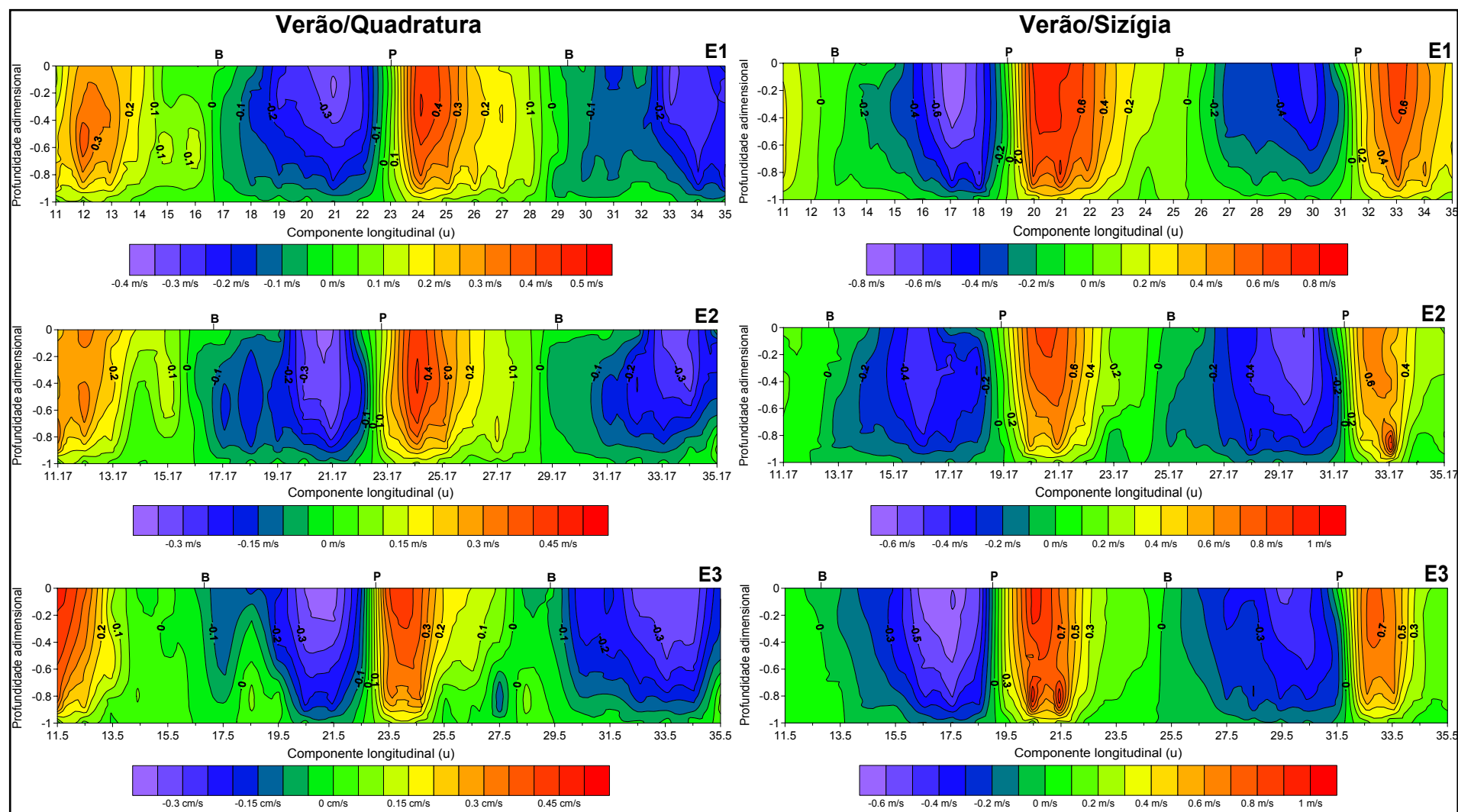


Figura 7.13. Isopletas da componente longitudinal u da velocidade da corrente de maré no canal do Pisa Sal nas estações E1 a E3 durante a maré de quadratura no período de verão. O eixo das abscissas representa a escala temporal (hora decimal) no período de 17 a 18/12/2007. Velocidades positivas e negativas referem-se, respectivamente, às marés de vazante e enchente. As letras B e P referem-se às estofas de baixa-mar e preamar (DHN), respectivamente.

As velocidades máximas de quadratura ocorrem desde a superfície até a meia profundidade, sejam nas marés de vazante ou enchentes. O tempo de ocorrência destas velocidades ao longo do canal, após as estofas de vazante e enchente, são de aproximadamente 4,42 e 1,42 horas (desembocadura), 5,0 e 1,62 horas (intermediária) e 4,5 a 5,0 horas e 1,0 horas (cabeceira). Na sizígia, da mesma forma que na quadratura, as velocidades máximas são registradas da superfície até meia água, com tempos de 4,5 a 4,75 horas após a estofa de vazante e 1,25 a 1,75 horas após a estofa de enchente (desembocadura); 3,5 a 5,25 horas após a estofa de vazante e 2,0 a 2,67 horas após a estofa de enchente (intermediária) e 4,38 a 5,25 horas após a estofa de vazante e 1,25 a 1,38 horas após a enchente (cabeceira) (Figura 7.13).

A configuração do perfil médio temporal de u na quadratura apresenta duas camadas de diferentes velocidade e orientações que mudam de posição a depender da localização no canal. Na cabeceira, essas camadas ocorrem nas profundidades de -0,2 e -0,7 Z; na porção intermediária, em -0,4 e -0,9 Z e, na cabeceira, ocorrem na superfície e -0,9 Z. Em consequência destas variações, a velocidade residual (u_a) mostra predominância das correntes de vazante na desembocadura do canal, enquanto, em direção à cabeceira, predominam as correntes de enchente, com valores respectivos de 0,01 m/s, -0,01 m/s e -0,02 m/s (Figura 7.14). Na sizígia, a componente u na região de cabeceira mostra uma camada que aparece, aproximadamente, na profundidade -0,65 Z e se estende até o fundo do canal. Na porção intermediária, a velocidade média máxima ocorre na camada superficial, atingindo o valor zero na profundidade -0,25 Z, a partir de onde é estabelecida inversão para enchente até próximo ao fundo, com velocidade média máxima na profundidade -0,7 Z. Na região de cabeceira, a velocidade decai ao nível zero na profundidade de -0,17 Z e estende-se até -0,5 Z a partir de onde predomina a corrente positiva. De uma forma geral, a velocidade residual mostra predominância das correntes de enchente na desembocadura, velocidade nula na porção intermediária e corrente de vazante na cabeceira (Figura 7.14).

7.3.1.3 Dados de Correntes - S4

Os dados da intensidade e direção das correntes com bóia S4 instalada na margem direita do canal do Pisa Sal (E4), aproximadamente a 50 m da estação de bombeamento da fazenda de camarão da Camarus (Figura 7.2) permitem a sua correlação com as correntes no centro do canal principal e nos CDs.

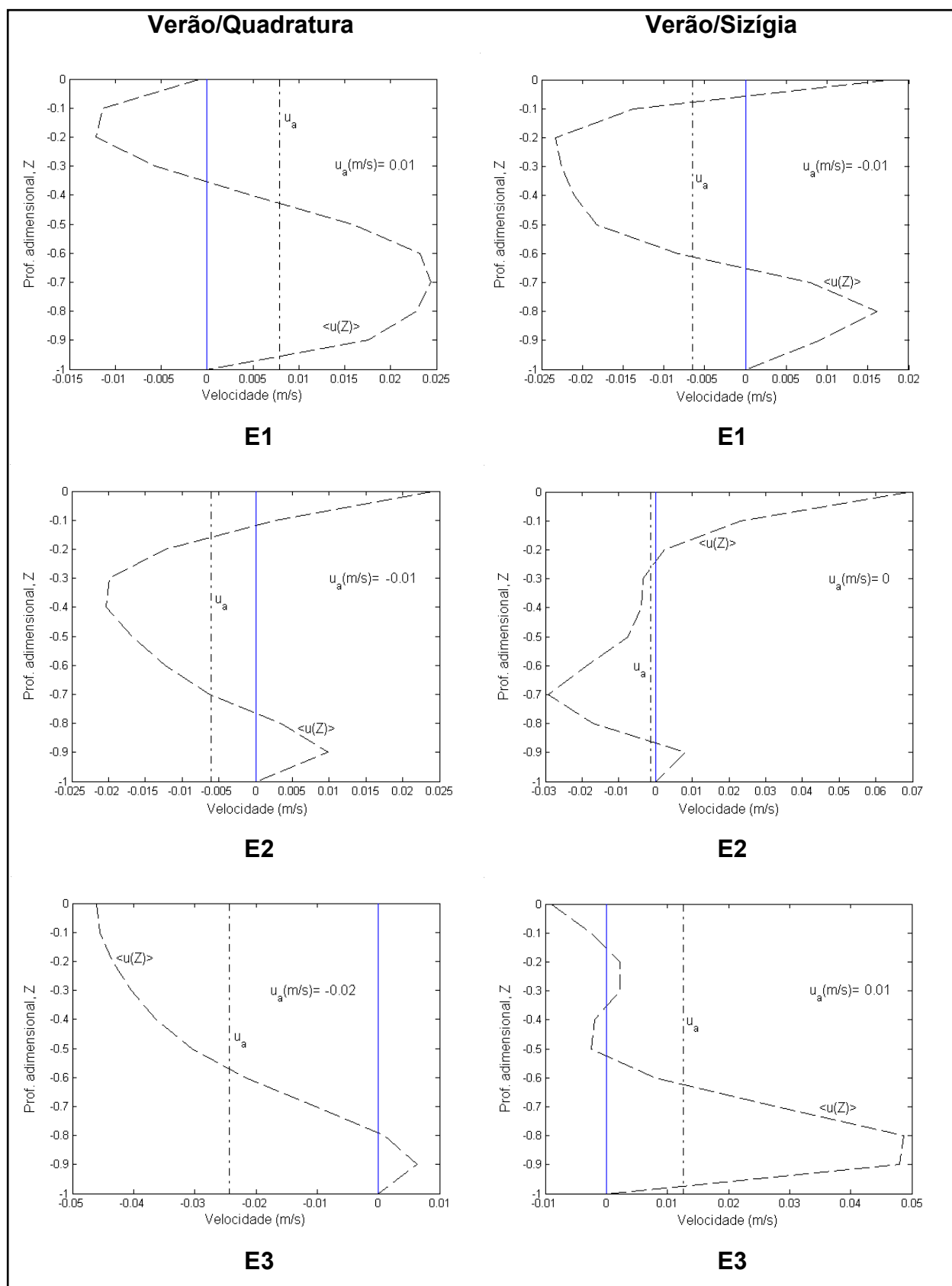


Figura 7.14. Perfil médio temporal da componente longitudinal da velocidade $\langle u(Z) \rangle$ (linha tracejada) no canal do Pisa Sal medidas nas estações E1 a E3 durante a maré de quadratura no período de verão. A velocidade residual (u_a) está representada pela linha traço-ponto e pelo seu respectivo valor.

O perfil da temporal da profundidade indica uma amplitude da coluna d'água de 2,7 m. Durante o estofo de preamar, a superfície livre sofre um rebaixamento de 0,25 a 0,30 m, provocado pelo bombeamento da água do canal Pisa Sal pela estação de bombas da fazenda para abastecimento dos viveiros de camarão (Figura 7.15). O referido bombeamento é realizado somente durante a preamar em um intervalo médio de 2,5 horas.

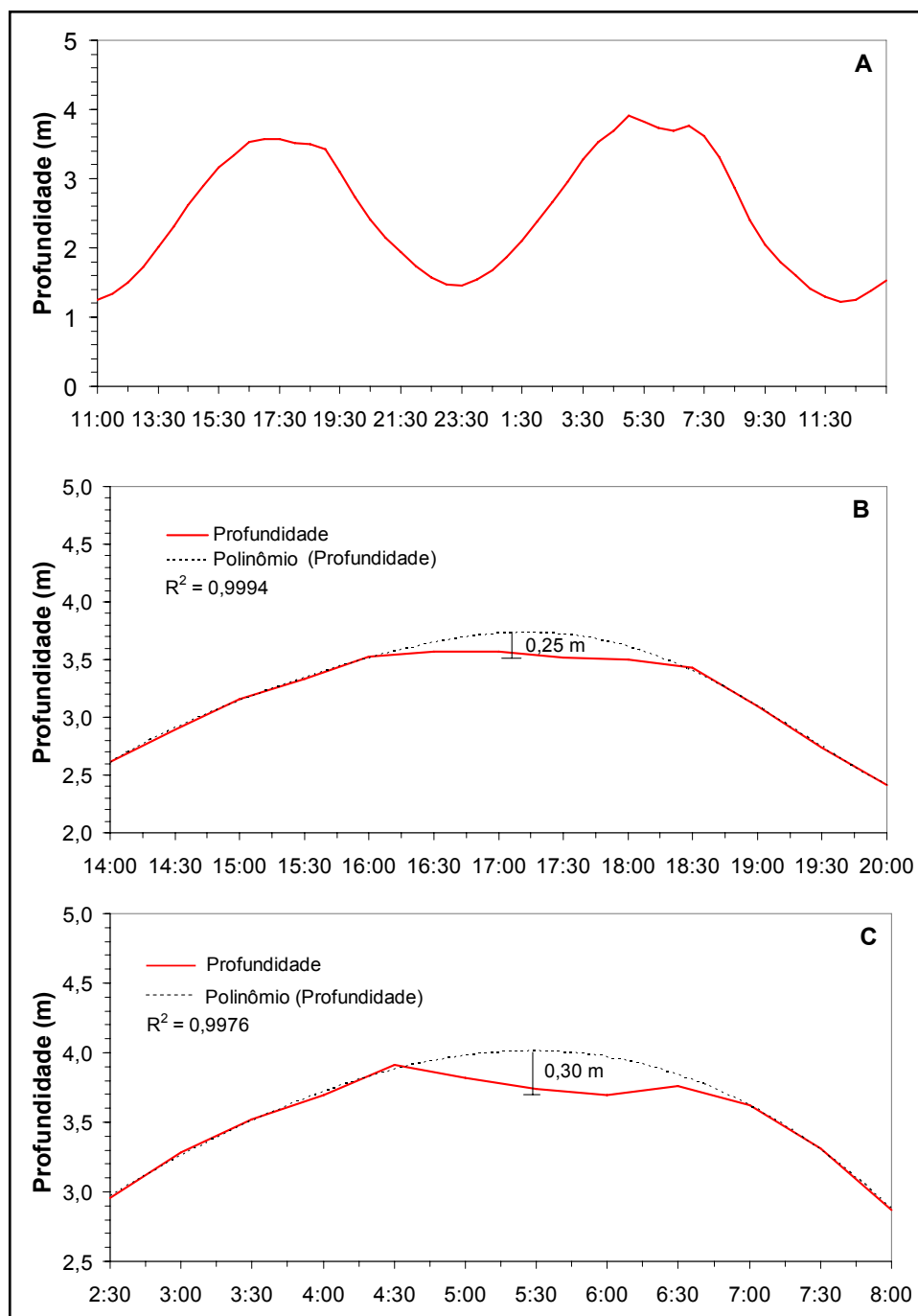


Figura 7.15. Curva de variação da lâmina d'água ao longo do período amostrado na estação E4 (A) e rebaixamento da superfície livre durante as estofas de enchente (B e C).

A componente u apresenta velocidades com grande variação de magnitude em relação à maré (Figura 7.16A). A velocidade média de vazante é da ordem de 0,16 m/s, enquanto, no período de enchente, é de 0,17 m/s. As velocidades máximas na maré vazante variam de 0,36 a 0,38 m/s e ocorrem, respectivamente, 2,0 horas após a estufa de enchente e 1,5 hora antes da estufa de enchente. Por sua vez, as máximas de enchente variam de -0,29 a -0,44 m/s e ocorrem respectivamente 3,0 horas após e 0,5 de hora antes da estufa de enchente (Figura 7.16A).

Durante as marés de vazante, a velocidade apresenta direções, variando entre W e NW, com predominância de direções WNW. Nas marés de enchente, essas direções variam de ESE a S, com predominância de ESE (Figura 7.16B).

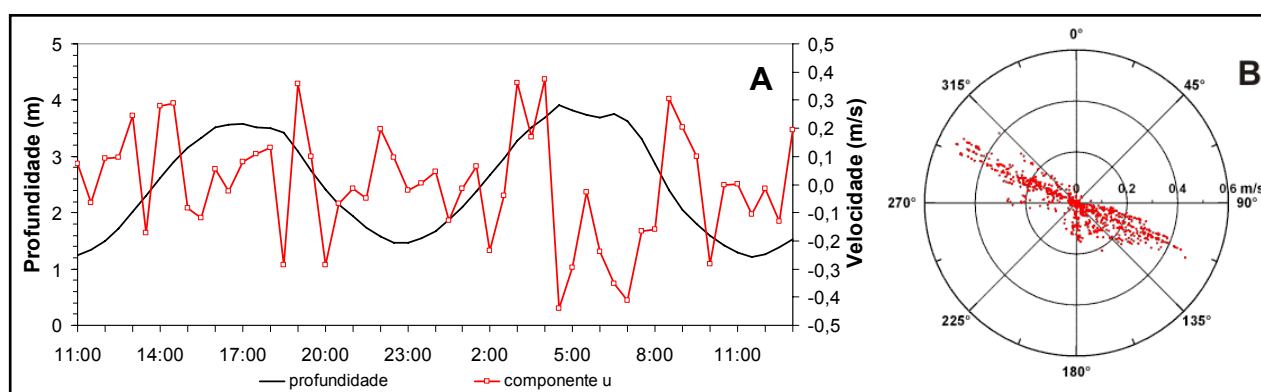


Figura 7.16. Variação da lâmina d'água e componentes u (A), direções das marés de vazante e enchente (B) na estação E4.

7.3.2 Canais de Despesca (CDs)

A altura da coluna d'água nas estações localizadas no interior dos CDs (E5 e E6) é, respectivamente, de 2,2 m e 1,8 m (Figura 7.17). Comparando essas alturas com a amplitude da maré no porto de Guamaré-RN (Diretoria de Hidrografia e Navegação-DHN), localizado no interior do complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré distando 3,5 km a Oeste das estações, observa-se que, somente na E5 (CD1), ocorre coincidência das alturas, enquanto, na estação E6 (CD2), existe uma diferença de 0,4 m que representam 18 % (Figura 7.17), a qual é atribuída à cota do fundo do canal na estação E6 que posiciona-se, aproximadamente, 0,5 m mais elevada que em E5.

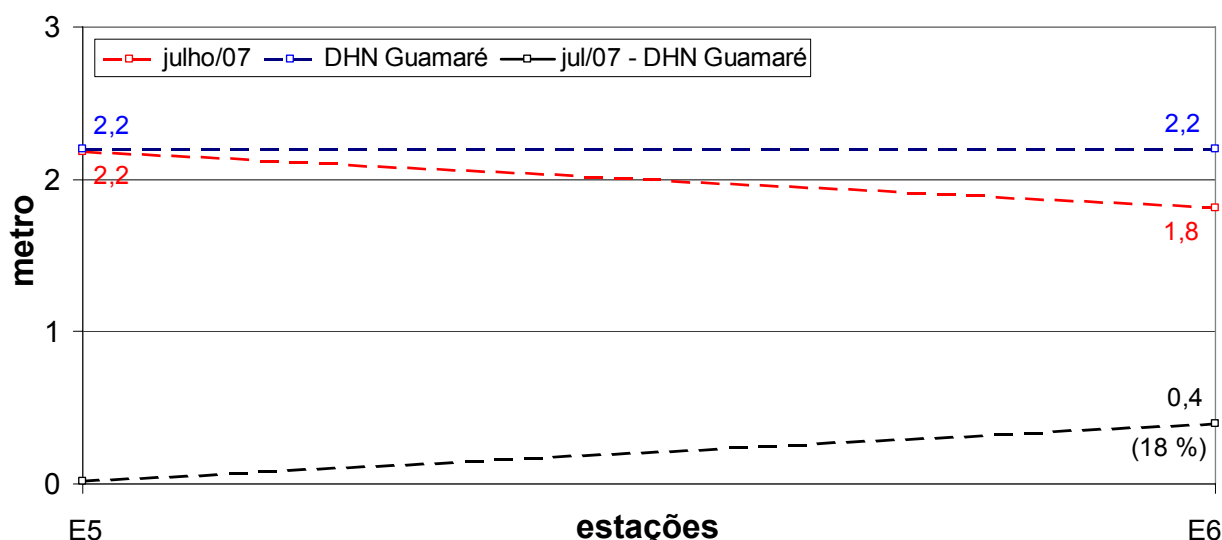


Figura 7.17. Altura da coluna d'água neste levantamento (julho/07) e amplitude da maré (porto de Guamaré, DHN).

Os dados de velocidade das correntes somente foram considerados até uma profundidade mínima aceitável entre 0,8 e 0,9 m, uma vez que os canais, durante a baixa-mar, ficam totalmente secos. Os canais de pesca atualmente comportam-se como canais de marés, onde não existe aporte fluvial. Assim, as velocidades consideradas são, exclusivamente, devido às correntes de marés que atuam no interior dos canais.

A média da componente u de vazante e enchente na estação E5 é maior que da estação E6. Na estação E5, as correntes de vazante apresentam velocidades médias de 0,27 m/s e as de enchente 0,20 m/s, enquanto, na E6, as velocidades médias de vazante e enchente são de 0,16 e 0,13 m/s, respectivamente (Tabela 7.3 e Figura 7.18).

Na E5, as velocidades máximas médias de vazante (0,55 a 0,58 m/s) e enchente (0,41 a 0,61 m/s) ocorrem a 3,5 a 4,0 e 1,5 a 2,0 horas depois e antes da estufa de enchente, respectivamente (Tabela 7.3). Entretanto, um pico de enchente na ordem de 0,61 m/s ocorre 3,0 horas após a estufa de enchente (9:00) (Figura 7.18A). As velocidades de vazante apresentam duas direções preferenciais, uma mais importante para NW e outra para WNW (Figura 7.18B e Tabela 7.3).

Tabela 7.3. Velocidades máximas ($\bar{u}_{\max}$), médias ($\bar{u}$), mínimas ($\bar{u}_{\min}$) da componente u nas marés de vazante (vz) e enchente (ec), alturas máximas ($h_{\max}$) e mínimas ($h_{\min}$) da lâmina d'água e amplitude da maré (A) nas estações E5 a E6 durante a maré de sizígia no período de inverno (14 a 17.07.2007).

Estação	Maré	$\bar{u}_{\max}$	$\bar{u}$	$\bar{u}_{\min}$	$h_{\max}$	$h_{\min}$	A	Direção NV*
					(m)			
E5	vz	0,58	0,27	0,02	2,8	0,6	1,10	NW e WNW
	ec	0,61	0,20	0,01				ESE
E6	vz	0,30	0,16	0,02	2,3	0,5	0,90	SE e SSE
	ec	0,28	0,13	0,00				NW e N

* NV= Norte Verdadeiro

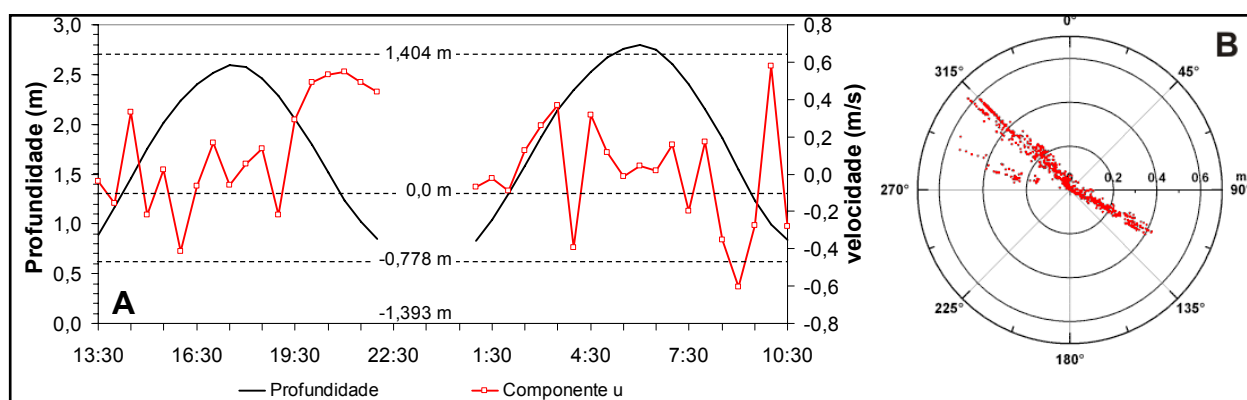


Figura 7.18. Variação da lâmina d'água, componente u (A) e direções das marés de vazante e enchente (B) na estação E5. As linhas pretas tracejadas na figura A representam as cotas da baixa-mar, o nível zero e da preamar.

Na estação E6, a componente u não apresenta as máximas médias de vazante e enchente, acompanhando a variação da lâmina d'água, inclusive com grande variação horária nas suas magnitudes. Da mesma forma, chegam a apresentar picos de 0,02 m/s no período da estufa de enchente (Figura 7.19A). As velocidades de vazante apresentam direções preferenciais para SE e SSE e as de enchente para NW e N (Figura 7.19B e Tabela 7.3). A inversão das direções da componente longitudinal nos dois CDs está associada à orientação geográfica das suas desembocaduras (Figura 7.2).

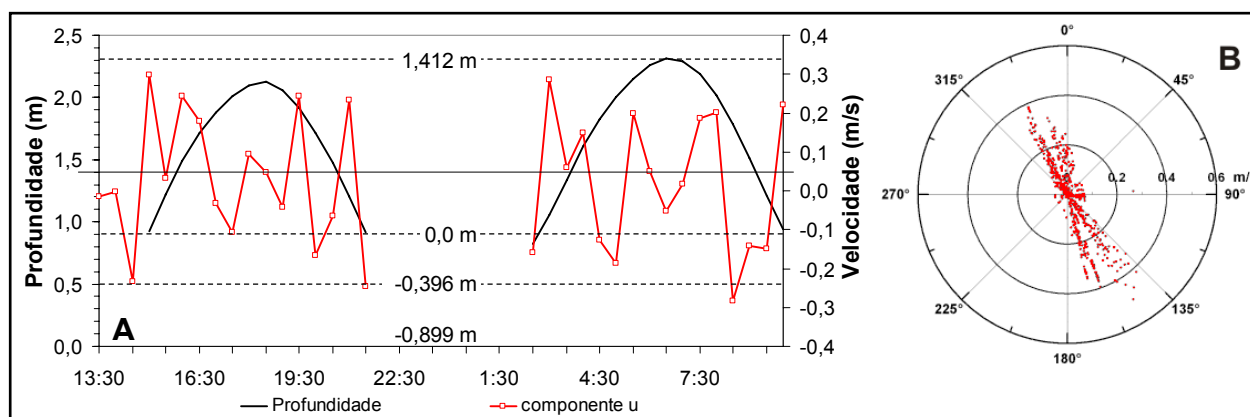


Figura 7.19. Variação da lâmina d'água, componente u (A) e direções das marés de vazante e enchente (B) na estação E6. As linhas pretas tracejadas na figura A representam as cotas da baixa-mar, do nível zero e da preamar.

7.4 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TERMOHALINAS

O estudo das propriedades termohalinas (temperatura, salinidade e densidade) do canal Pisa Sal é importante para estabelecer uma classificação própria para este ambiente, bem como para entender a influência sobre os processos hidrodinâmicos atuantes e o desenvolvimento dos organismos nos diferentes ecossistemas.

Para entender o comportamento hidrodinâmico e das propriedades termohalinas locais, é fundamental compreender e classificar os ambientes costeiros transicionais onde ocorrem mudanças importantes dessas propriedades, seja por influência climática, seja por interferência humana. Por sua vez, a diversidade de tipos de embaiamentos costeiros dificulta essa classificação de forma a contemplar a maioria dos casos, dentre os quais, estão incluídos os estuários. A área estudada, apesar de não ser um estuário, apresenta características semelhantes, como se ver-se-á a seguir.

7.4.1 Estuários

Vários são os autores, sejam oceanógrafos, geólogos, engenheiros, geógrafos ou ecologistas que utilizam o termo estuário (latim, *Aestus* = maré) para indicar a região interior de um ambiente costeiro, onde as águas fluviais encontram as águas do mar transportadas pelas correntes de marés, estendendo-se rio acima até o limite de influência da maré (Miranda *et al.*, 2002).

Vários são os critérios adotados para classificar os estuários, a saber: salinidade, processos físicos (ondas e marés), gênese da bacia, padrão de circulação e processos deposicionais. Na definição clássica adotada por Cameron e Pritchard

(1963) e, posteriormente, Pritchard (1967), que utiliza como parâmetro a salinidade, considera que “estuário é um corpo de água costeira semi-fechado que tem uma conexão livre com o mar aberto e, dentro do qual, a água do mar é mensuravelmente diluída na água doce derivada da drenagem terrestre” (Figura 7.20).

A classificação de estuários segundo Cameron e Pritchard (1963) que considera apenas os estuários positivos, onde o somatório do volume de água doce proveniente da precipitação (P) e a descarga fluvial (Q_f) é maior que o volume de água que chega à atmosfera através da evaporação (E) deixaria muitos corpos costeiros (canais e lagunas) do Nordeste brasileiro, e especialmente do estado do Rio Grande do Norte, fora desta classificação, uma vez que o volume de chuvas e o aporte fluvial nessas regiões é insignificante. Nesses casos, o balanço de água guarda a seguinte relação: $P + Q_f < E$, denominando o ambiente de estuário negativo; segundo Cameron e Pritchard (1963), nestas condições, o corpo não poderia ser classificado como estuário.

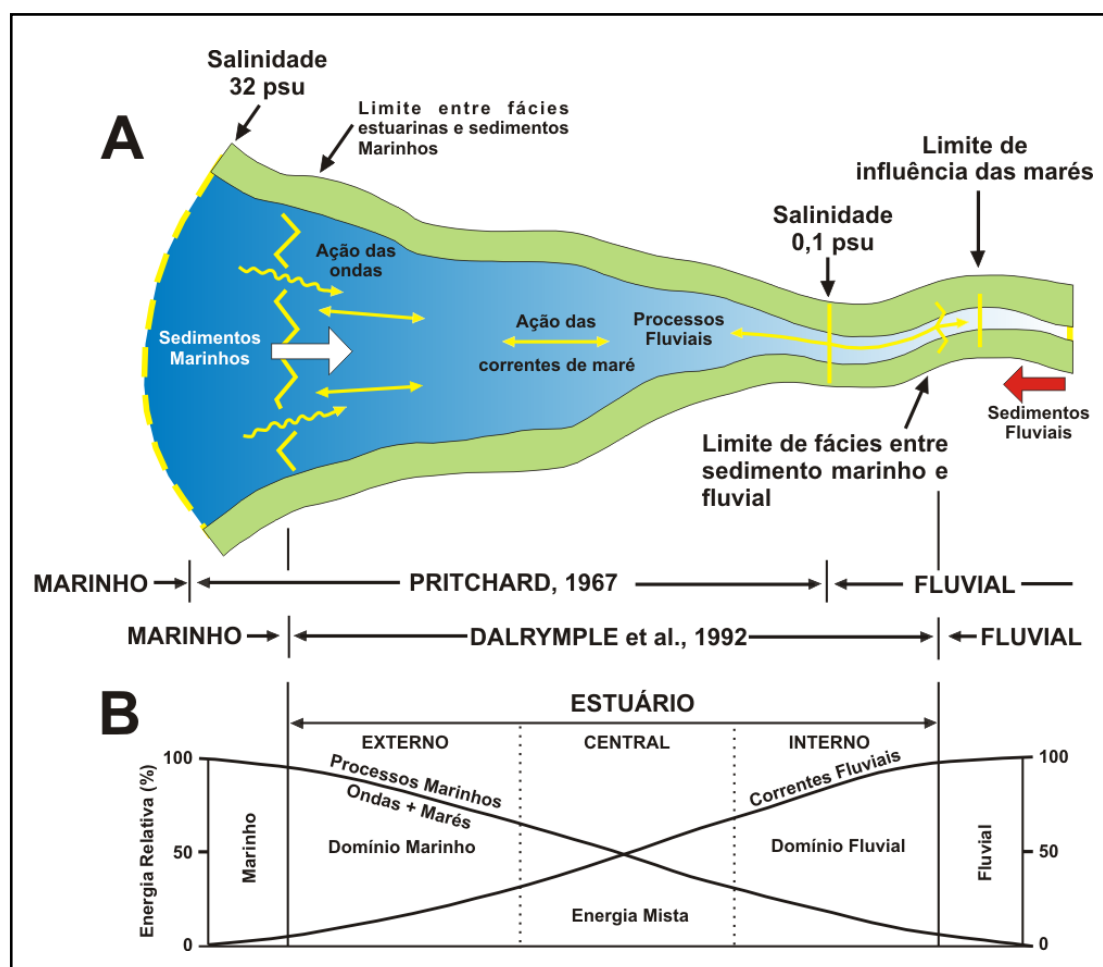


Figura 7.20. Representação esquemática das definições de estuário segundo Pritchard (1967) e Dalrymple *et al.* (1992). Limite de salinidade e de fácies em direção ao continente e oceano (A) e distribuição esquemática dos processos atuantes em relação a energia relativa nos diversos setores do estuário.

Segundo Kjerfve (1987 *apud* Miranda *et al.* 2002) que leva em consideração à gênese geológica, fatores climáticos, sedimentação recente e forçantes dinâmicas, “estuário é um ambiente costeiro que apresenta restrita conexão com o oceano adjacente e que tal conexão permanece aberta pelo menos intermitentemente”. Ainda subdivide o estuário nas seguintes zonas: Zona de Maré do Rio (ZR), com salinidade praticamente igual a zero, mas ainda sob influência da maré; Zona de Mistura (ZM), local onde ocorre a mistura da água doce fluvial com a água do mar e a Zona Costeira (ZC), que se estende até à frente da pluma estuarina. A salinidade nas ZM e ZR varia de 1 a 35 ‰ e < 1 ‰, respectivamente.

A concepção de Dalrymple *et al.* (1992) que considera “estuário a parte voltada para o mar de um sistema de vales inundados, os quais recebem sedimentos de fontes fluviais e marinhas, contendo fácies influenciadas pelo mar, ondas e processos fluviais” (Figura 7.20), bem como a de Dyer (1997), que trata estuário como um “corpo de água costeiro semi-fechado, com interligação livre com o oceano aberto, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré, sendo que, no seu interior, a água é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental”, caracterizam os estuários quanto a sua extensão, mas não facilitam a sua classificação.

Tomczak (2000), analisando o conceito clássico de Cameron e Pritchard (1963), sugere três modificações de forma a incluir todos os tipos de estuários, a saber:

- Existência de uma separação intermitente entre o estuário e o mar. A formação de barras arenosas em algumas regiões com grandes variações de precipitação pluviométricas poderia gerar lagos de água salobra temporários.
- Considerar os locais onde a evaporação é superior ao aporte das águas doces dos rios e das chuvas locais, deixando as águas dos estuários mais salinas que a do mar, onde os estuários são conhecidos como negativos ou inversos.
- Considerar a pequena largura dos estuários separando-os dos mares mediterrâneos.

Estas considerações facilitarão a caracterização dos estuários nordestinos, geomorfologicamente caracterizados como de planície costeira, bem como, principalmente, os estuários do litoral Norte potiguar que ocorrem em costas arenosas, onde de uma maneira geral, os rios são intermitentes, os canais são estreitos e rasos e a precipitação é inferior à evaporação. Assim, a definição de Tomczak (2000) é de grande importância para os estudos dos estuários nordestinos: “Estuário é um corpo de

água costeira, estreito com comunicação livre com o mar aberto, pelo menos intermitentemente e dentro do qual a salinidade da água é mensuravelmente diferente da salinidade do oceano aberto”.

Os sistemas de classificação propostos para estuários baseiam-se em três critérios principais, a saber: principais forçantes que controlam a movimentação da água, geomorfologia e modelos de circulação, os quais serão referenciados a seguir.

O primeiro sistema de classificação de estuários foi proposto por Stommel (1951 *apud* Miranda *et al.* 2002), que se baseou nas principais forças dominantes que controlam a movimentação da água nos estuários e que dividiu em três tipos: estuários dominados por ventos, estuários dominados por marés e estuários dominados por rios. Em alguns estuários, existe mais de uma força controladora da circulação e mistura de água, dificultando o uso desta classificação.

Posteriormente, Pritchard (1952) estabeleceu um dos principais sistemas de classificação de estuários, baseado na geomorfologia, e apresentou os seguintes tipos: estuários de planícies costeiras (vales de rios afogados); de *fjords* e de barras, conforme caracterizados a seguir.

- Planícies costeiras: são formados por inundação dos vales dos rios devido à ascensão do nível do mar ao longo do tempo geológico. Caracterizam-se por baixa taxa de sedimentação e a morfologia é aquela do antigo vale afogado. São rasos com profundidade raramente superior a 30 metros e localizados em zonas de clima temperado.

- Fiordes: apresentam vales escavados por movimento de geleiras rumo ao mar. São profundos, alguns superiores a 800 metros. Exibem soleiras na boca dos rios formadas pelos sedimentos acumulados na frente das geleiras. Os estuários de *fjord* típicos são somente encontrados em zonas temperadas.

- Construídos por barreiras: são vales de rios afogados, com altas taxas de sedimentação. São rasos, com profundidades de poucos metros e, normalmente, com ramificações nas proximidades das desembocaduras num sistema de canais rasos (lagunas). O sedimento acumula-se próximo à desembocadura do estuário, formando barras, onde a profundidade da água decresce ainda mais. Estuários construídos com barreiras são comuns nos trópicos e sub-trópicos, mas podem ocorrer onde a zona costeira é caracterizada pela deposição de sedimento (Tomczak, 2000).

Quando as ondas têm maior influência nos estuários, o transporte longitudinal ou normal às praias começa a formar um depósito de um pontal arenoso em frente à

desembocadura do estuário. Nos estuários onde as ondas são dominantes, formam-se três ambientes importantes: barreira arenosa, bacia central com lama e delta de maré vazante. Se as correntes são agentes mais importantes que as ondas, estas permitem maior movimentação entre o estuário e o mar aberto, dificultando o desenvolvimento de deltas de vazante, bacia central lamosa ou uma barreira arenosa discreta. Em contrapartida, uma série de barras de areias ornamentadas de dunas é ideal para se transformar em depósitos planos, de areia, sob influência de correntes e, finalmente, em canais totalmente fluviais. Neste caso, uma zona de baixa energia também é gerada, mesmo sem formar depósito de sedimento fino. (Dalrymple *et al.*, 1992).

Pritchard (1955) classifica os estuários segundo os modelos de circulação e que são regulados por dois processos principais: advecção (fluxo que inclui correntes e deslocamentos de água) e difusão (misturas túrbidas com troca de sais somente entre as águas do rio e do mar), a saber:

- Cunha Salina: a água doce flui sobre a salgada sem ocorrer mistura. Embora haja uma interface no contato das duas, não existe migração e troca de sal na vertical, que se dá em função da vazão do rio e da capacidade de penetração da maré. Uma redução no fluxo do rio aumenta o avanço da cunha salina. Ao aumentar a carga do rio, a cunha retrai-se para o mar.
- Parcialmente Misturado: não existe um gradiente salino marcante com trocas verticais de íons, mas formam-se duas camadas, uma mais salina no fundo e outra mais doce acima, com uma interface entre as duas, formada por uma zona de mistura. Quando aumenta a penetração da água salgada, mesmo sem redução da vazão do rio, o gradiente salino vai aumentando da desembocadura rumo à montante.
- Homogêneo: ocorre penetração de um grande volume de água salgada no estuário, que contrabalança a descarga do rio, dando origem a uma coluna de água, com água doce apenas na superfície.

A classificação quantitativa dos estuários também pode ser estabelecida a partir do Diagrama Estratificação-Circulação proposto por Hansen e Rattray (1966), que utiliza a relação entre dois parâmetros adimensionais: no eixo x, está o parâmetro circulação definido pela relação u_s/u_f , onde u_s é o valor da corrente residual na superfície e u_f é o valor médio da componente velocidade gerada pela descarga fluvial. Quando u_f não é conhecido, utiliza-se o valor médio da velocidade na coluna d'água (Miranda *et al.*, 2002). No eixo y, está o parâmetro estratificação, que é definido pela relação $\delta S / S$, onde δS representa a diferença entre a salinidade de fundo e de

superfície e S representa a salinidade média da coluna d'água. O Diagrama Estratificação-Circulação define campos que classificam os estuários nos seguintes tipos:

- Tipo 1: o fluxo residual estuário abaixo em todas as profundidades e o transporte de sal estuário acima é devido somente ao processo de difusão turbulenta.
- Tipo 2: o fluxo residual reverte com a profundidade e os processos advectivo e dispersivo são importantes para o transporte de sal estuário acima.
- Tipo 3: o transporte de sal estuário acima ocorre, quase que exclusivamente, pelo processo advectivo.
- Tipo 4: apresenta estratificação de salinidade máxima e corresponde aos estuários tipo cunha salina.

Outros tipos de estuários são apresentados na classificação geomorfológica de Fairbridge (1980 apud Miranda 2002), tais como: fiorde, ria, planície costeira, delta estuarino, construído por barra, delta, laguna costeira e tectônico (Figura 7.21)

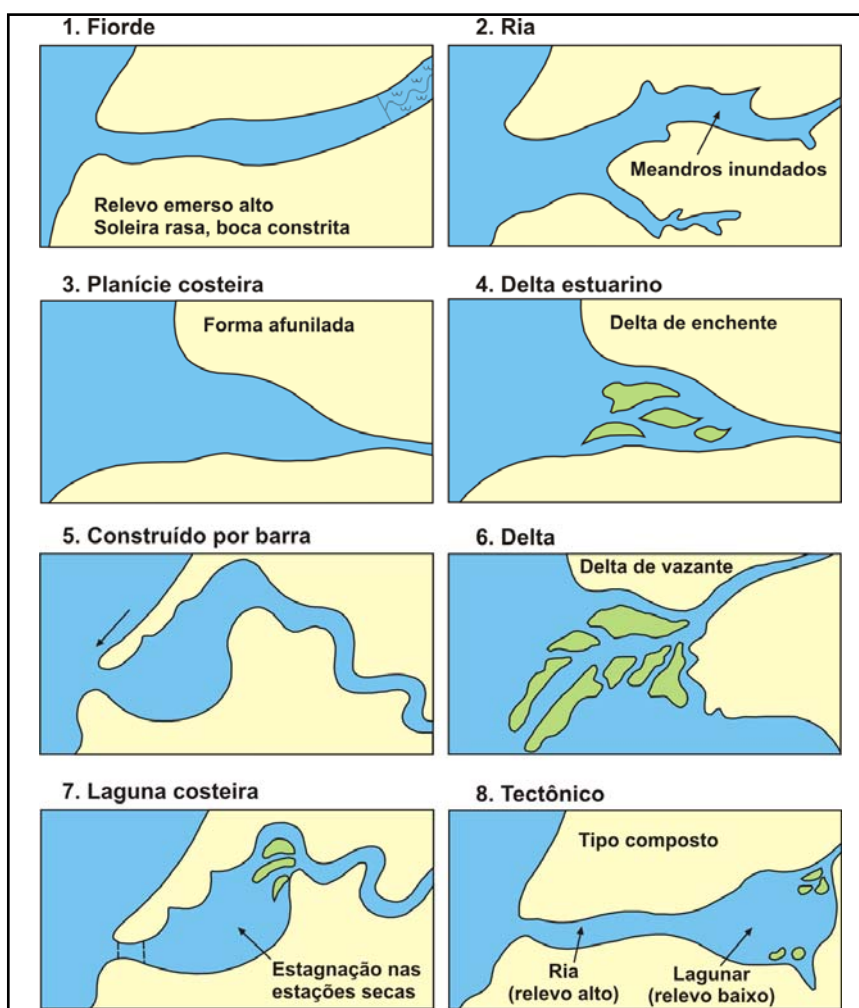


Figura 7.21. Classificação geomorfológica de estuários segundo Fairbridge (1980 apud Miranda *et al.* 2002).

Considerando as misturas de águas do rio e do mar, Thurman & Trujillo (1999) classificam os estuários em quatro tipos. Entretanto, esta classificação não pode ser aplicada integralmente a todos os tipos de estuário, pois a mistura no seu interior pode depender de outros fatores tais como a morfologia, as estações do ano e as condições de marés.

- Verticalmente Misturado: ocorre quando o estuário tem pouca profundidade e o volume de água é pequeno, com fluxo quase que só da cabeceira para a foz. Na vertical, a salinidade pode ser uniforme, porque a mistura de pequeno volume é mais completa, mas pode acontecer que a salinidade aumente da cabeceira para a foz do estuário.

- Parcialmente Estratificado: quando o estuário é mais profundo, a salinidade tende a aumentar da cabeceira para a foz, em qualquer ponto na vertical. Neste caso é possível diferenciar a camada superficial mais doce e a inferior, salgada, separadas pela zona de mistura. É comum a formação de um tipo de estuário com água doce, fluindo para o oceano e água salgada migrando para as cabeceiras do estuário, pela parte mais baixa do leito.

- Altamente Estratificado: outro caso de estuário profundo, mas, apenas na camada superior, a salinidade aumenta da cabeceira para a foz. Já as camadas mais profundas são uniformes com as águas de mar aberto, independente da profundidade e da largura do estuário. Isto resulta num fluxo semelhante ao do estuário parcialmente estratificado, porém, na mistura da interface, a água mais salgada flui de baixo para cima, a fim de atingir os níveis superiores. Por outro lado, as águas mais doces deslocam-se das cabeceiras para a foz, tornando-se cada vez mais salgadas, pelo contato com a água do mar. Nestes casos, há possibilidade de existência de haloclina, com forte variação de salinidade, no contato das águas inferiores com as superiores.

- Cunha Salina: a água do mar, em forma de cunha, penetra no estuário rumo à montante. Isto acontece nos rios, onde a foz tem grande profundidade e grande volume de água. Não se observa gradiente vertical da salinidade, porque não há mistura. A água permanece doce ao longo de toda extensão do estuário e, às vezes, prosseguindo além dele. O único gradiente de salinidade que se pode observar é o que se forma na horizontal, ao longo da largura do estuário. Em grandes profundidades, pode haver desenvolvimento de *haloclina*.

Estudos realizados por da Silva *et al.* (2006) nos estuários hipersalinos do Apodi-Mossoró, Piranhas-Açu, Guamaré e Galinhos, localizados no litoral setentrional

do RN, mostram que em todos os estuários supra citados, a salinidade aumenta na direção estuário acima, devido à influência desprezível da descarga fluvial e à taxa de evaporação ser muito maior que a precipitação. Com isso, a salinidade da água de fundo aumenta e, conseqüentemente, a densidade, provoca a formação de uma camada de fundo altamente densa que flui em direção ao oceano, caracterizando-se estes corpos como “estuários inversos”, conforme as considerações de Tomczak (2000).

Assim, os “estuários” do litoral setentrional do RN, especialmente o braço de mar de Galinhos-Guamaré, região onde está inserida a área objeto desse estudo, são ambientes hipersalinos, forçados, predominantemente, pela maré e exibindo comportamento de estuário Verticalmente Bem Misturado, segundo Pritchard (1955) e Cameron & Pritchard (1963).

7.4.2. O Complexo Estuarino Lagunar Galinhos-Guamaré

O complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré desenvolveu-se atrás de um sistema de antigas ilhas barreiras, com orientação aproximadamente E-W, em um litoral aberto, com regime de mesomaré e dominado por ondas.

Segundo Caldas (2002), o complexo supra citado tem permanecido ativo desde quando o nível do mar atingiu sua posição atual pela primeira vez no Holoceno, por volta de 7.000 anos BP. Durante o máximo da transgressão holocênica (~ 5.900 anos BP), barreiras transgressivas, ao longo da costa, formaram o sistema ilha-barreiras e propiciaram uma sedimentação típica lagunar na paleocosta (Figura 7.22A).

O pontal de Galinhos formou-se durante a queda do nível do mar, quando o transporte de sedimentos ao longo da costa fechou os canais antigos que ligavam o mar à laguna e o transporte dunar para Oeste e Sudoeste foi intensificado, o que ocorreu em aproximadamente 3.600 anos BP (Figura 7.22B). Os fechamentos dos canais tiveram início um pouco antes de 3.330 anos BP, quando os primeiros *beachrocks* paralelos à praia e perpendicular aos antigos canais formaram-se (Caldas 2002). Atualmente, existe apenas um canal de maré (*inlet*) na porção Oeste do pontal (restinga de Galinhos), ligando a laguna ao mar aberto.

Silveira (2002), estudando a região de Guamaré-RN caracterizou um corpo arenoso estreito e alongado, paralelo à linha de costa, limitando-se a Leste pelo canal de Guamaré e Oeste pela ponta do Amaro, o qual a referida autora denominou de Ilha Barreira do Amaro. A referida barreira é cortada por um canal de maré que faz a

comunicação do mar e com o estuário de Guamaré, seguindo planícies de intermaré e supramaré, além de grande desenvolvimento de mangues. Imagens de satélite de julho de 2001 mostram a presença de uma barra arenosa acoplada à ilha barreira com aproximadamente 1,67 km de extensão e migração para W.

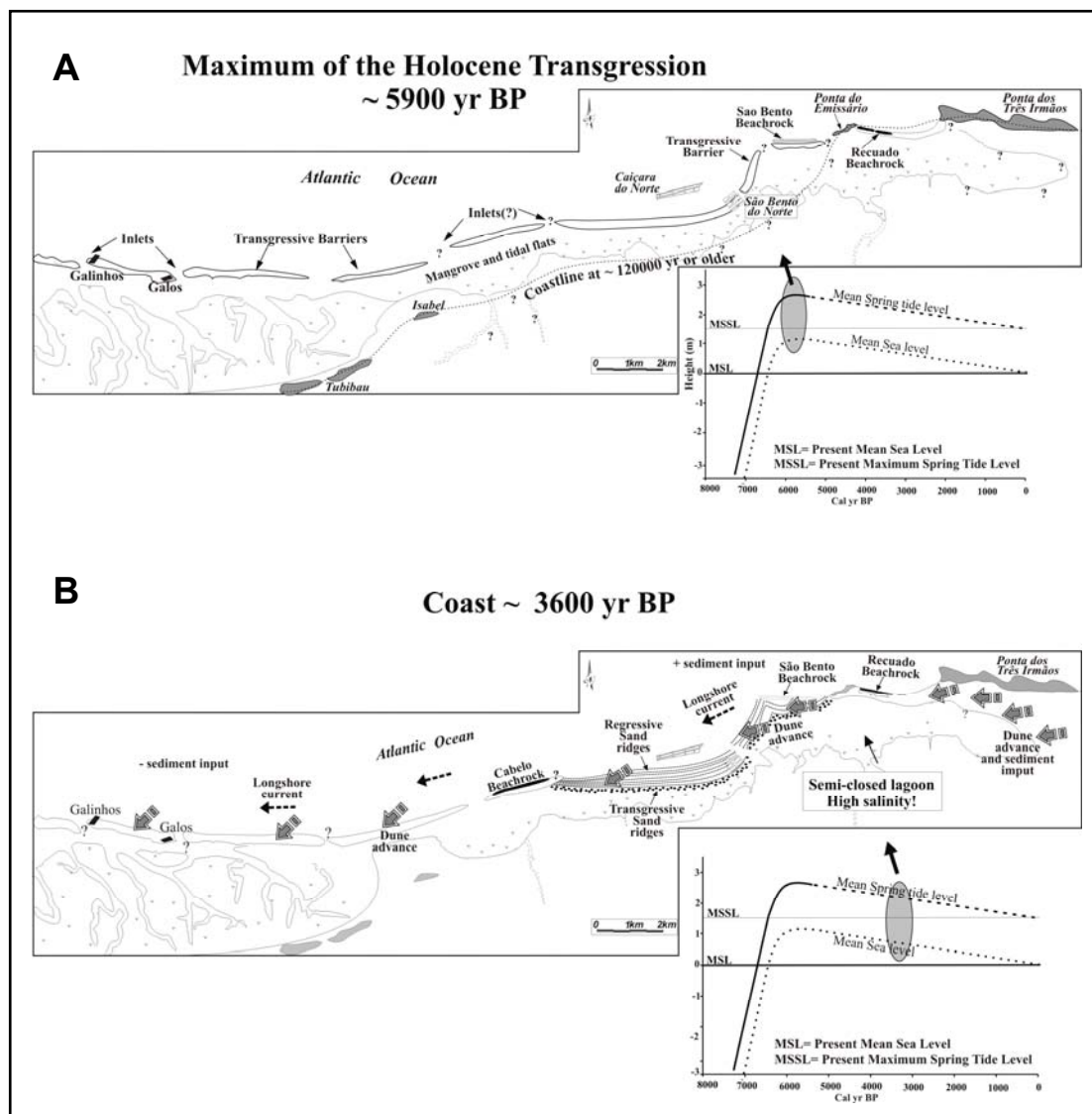


Figura 7.22. Paleogeografia da costa na região de Galinhos-São Bento do Norte-RN em ~ 5.900 anos BP (A) e morfologia em ~ 3.600 anos BP (B) (modificado de Caldas, 2002).

Andrade (2003), utilizando dados geológicos de superfície, fotografias aéreas e perfis de GPR na região de Galos, município de Galinhos-RN, caracterizou os processos e produtos sedimentares e associação lateral de fácies, que levou à identificação fácies sedimentares de canal de maré, conferindo para o pontal de Galinhos uma evolução relacionada a um sistema de ilha barreira, que veio a ser confirmado por Lima (2004).

Lima (2004) utilizou Radar de Penetração no Solo (GPR) para estudar a evolução do *spit* de Galinhos, município de Galinhos-RN. Este estudo identificou a presença de cinco ambientes deposicionais, a saber: antepraia (*shoreface*), canal de maré (*inlet*), estirâncio (*foreshore*), leque de lavagem (*washover*) e dunas. Para Lima (2004), a história evolutiva do pontal de Galinhos apresenta os seguintes estágios: a) sedimentação na antepraia e abertura de canais de marés, formando ilhas barreiras paralelas a costa; b) obstrução dos canais de marés pelas correntes de deriva litorânea (E para W) e migração do canal principal para W, finalizando com o seu abandono e preenchimento; c) erosão dos antigos canais de marés e formação de depósitos de *foreshore*; d) formação de depósitos de *washover*; e) formação de campos de dunas com orientação E-W e f) mudança no regime de vento, formando campos de dunas com orientação NE-SW. A existência de um paleocanal que separou o *spit* de Galinhos, entre a cidade de Galinhos e o distrito de Galos, levou à interpretação de um sistema de ilhas barreiras para a área.

7.4.3 Sistema Pisa Sal

O comportamento das propriedades termohalinas (temperatura, salinidade e densidade) do canal Pisa Sal foi analisado para os períodos de inverno e verão durante às marés de quadratura e sizígia e cujos resultados foram utilizados para classificá-lo, segundo o padrão de circulação, conforme será apresentado a seguir.

7.4.3.1 Inverno

A temperatura mostra pequenas variações em relação às marés de quadratura e sizígia, bem como entre estações, quando a temperatura média variou durante o inverno entre 26,90 e 27,33 °C, valores esses registrados na E3 durante a maré de sizígia e quadratura, respectivamente. Na mesma estação, também foram registradas as temperaturas mínima (26,54 °C) e máxima (27,44 °C). As temperaturas médias em todas as estações durante as marés de quadratura são sempre maiores que durante a sizígia (Tabela 7.4).

Os diagramas de isopletras mostram que a temperatura não sofre variações significativas com a profundidade seja durante a quadratura ou sizígia, entretanto observa-se uma maior homogeneidade vertical durante a sizígia. Núcleos isolados de temperaturas mais baixas e mais elevadas ocorrem tanto na quadratura quanto na sizígia, como mostrado nas estações E1 e E2 (quadratura) e E2 (sizígia) (Figura 7.23).

A salinidade média variou entre 37,43 PSU (E1) e 39,75 PSU (E3), enquanto as salinidades mínima e máxima foram de 36,41 PSU (E1) e 41,08 PSU (E3), indicando aumento da salinidade canal acima. Nas estações E1 e E2, as salinidades médias mais altas ocorrem durante as marés de sizígia, enquanto na estação E3 ocorre durante a quadratura (Tabela 7.4).

Tabela 7.4. Variação da temperatura, salinidade e densidade nas estações E1, E2 e E3 no canal Pisa Sal durante o inverno e verão nas marés de quadratura (qd) e sizígia (sz).

ÉPOCA	EST.	Maré	T (°C)			S (PSU)			σ_t		
			min	med	max	min	med	max	Min	med	max
Inverno	E1	qd	26,84	27,30	27,66	36,59	37,43	38,42	23,79	24,50	25,13
		sz	26,56	26,94	27,52	36,41	37,52	38,88	23,74	24,69	25,76
	E2	qd	26,59	27,28	27,68	36,56	37,77	38,85	23,78	24,76	25,86
		sz	26,55	26,96	27,71	36,50	37,86	39,22	23,52	24,90	26,17
	E3	qd	26,77	27,33	27,74	37,71	39,75	41,08	24,69	26,23	27,25
		sz	26,54	26,90	27,44	36,47	39,13	40,91	23,76	25,93	27,23
Verão	E1	qd	27,54	28,04	28,72	37,99	39,13	40,09	24,60	25,47	26,27
		sz	27,01	27,50	27,98	37,73	39,01	40,33	24,54	25,61	26,66
	E2	qd	27,66	28,12	28,78	38,18	39,60	40,69	24,79	25,80	26,72
		sz	27,13	27,49	28,08	37,77	39,34	40,70	24,60	25,87	26,95
	E3	qd	27,75	28,43	29,25	40,07	41,90	43,18	23,82	27,32	28,83
		sz	27,02	27,48	27,99	38,07	40,78	42,60	24,78	26,97	28,42

A variação da salinidade durante a quadratura e sizígia mostra isohalinas bem verticalizadas, com maiores salinidades associadas às baixa-mares e menores salinidades associadas às preamares, as quais mostram insignificantes variações entre a superfície e o fundo, principalmente nas estações E1 e E3 (Figura 7.24).

A densidade média varia de 24,50 Sigma-t (E1) e 26,23 Sigma-t (E3), enquanto as densidade mínimas e máximas são respectivamente 23,52 Sigma-t (E2) e 27,25 Sigma-t (E3). A densidade média aumenta canal acima seja durante as marés de quadratura, seja durante a sizígia (Tabela 7.4).

O padrão das isopletras de Sigma-t é bastante semelhante ao das isopletras de salinidade, mostrando isopicnais bastante verticalizadas, principalmente na maré de sizígia. Insignificantes variações que aumentam com a profundidade podem ser observadas durante a quadratura nas três estações (Figura 7.25).

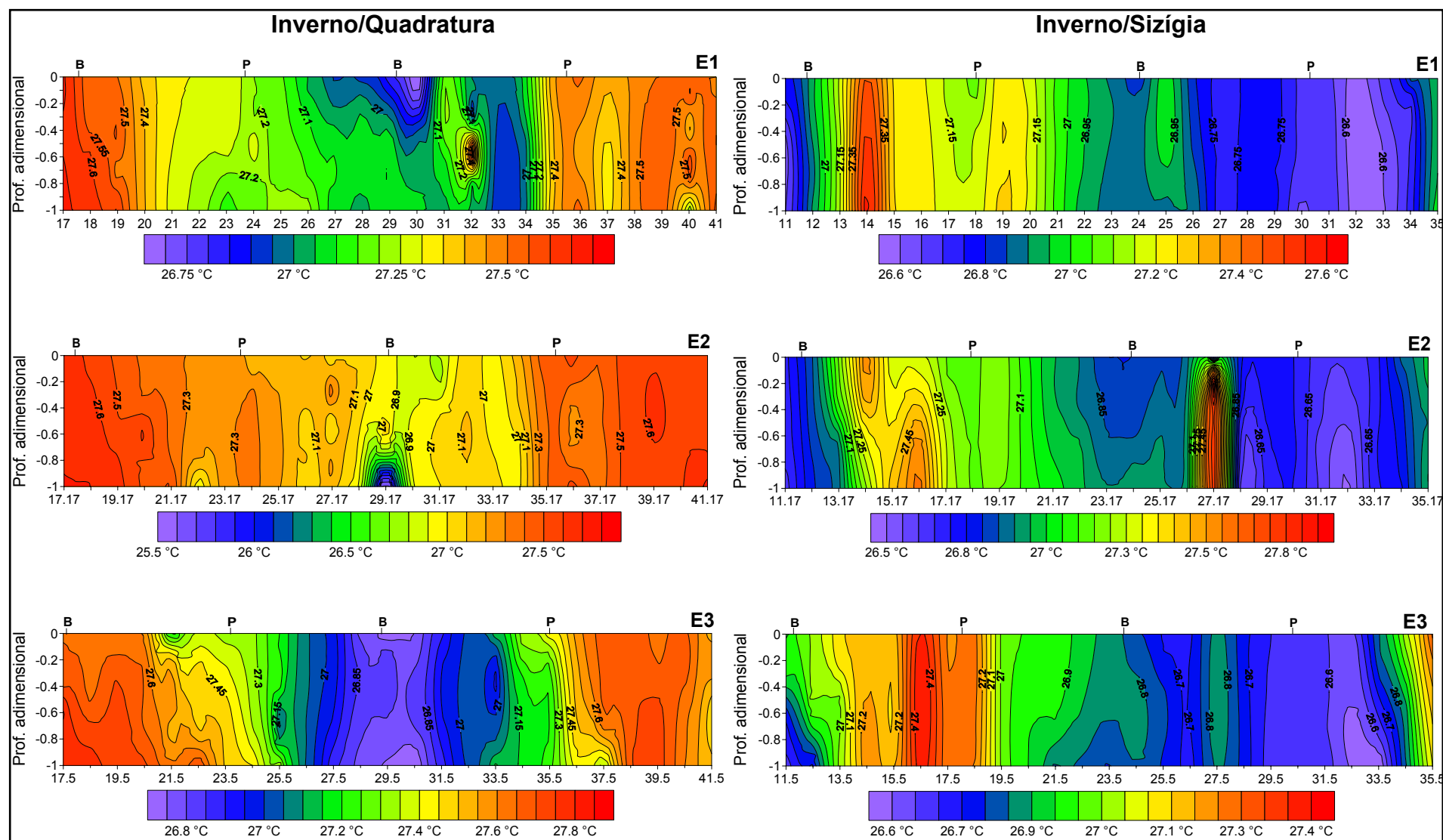


Figura 7.23. Variação temporal da temperatura (°C) na coluna d'água do canal Pisa Sal nas estações E1, E2 e E3 no período de inverno durante as marés de quadratura e sizígia.

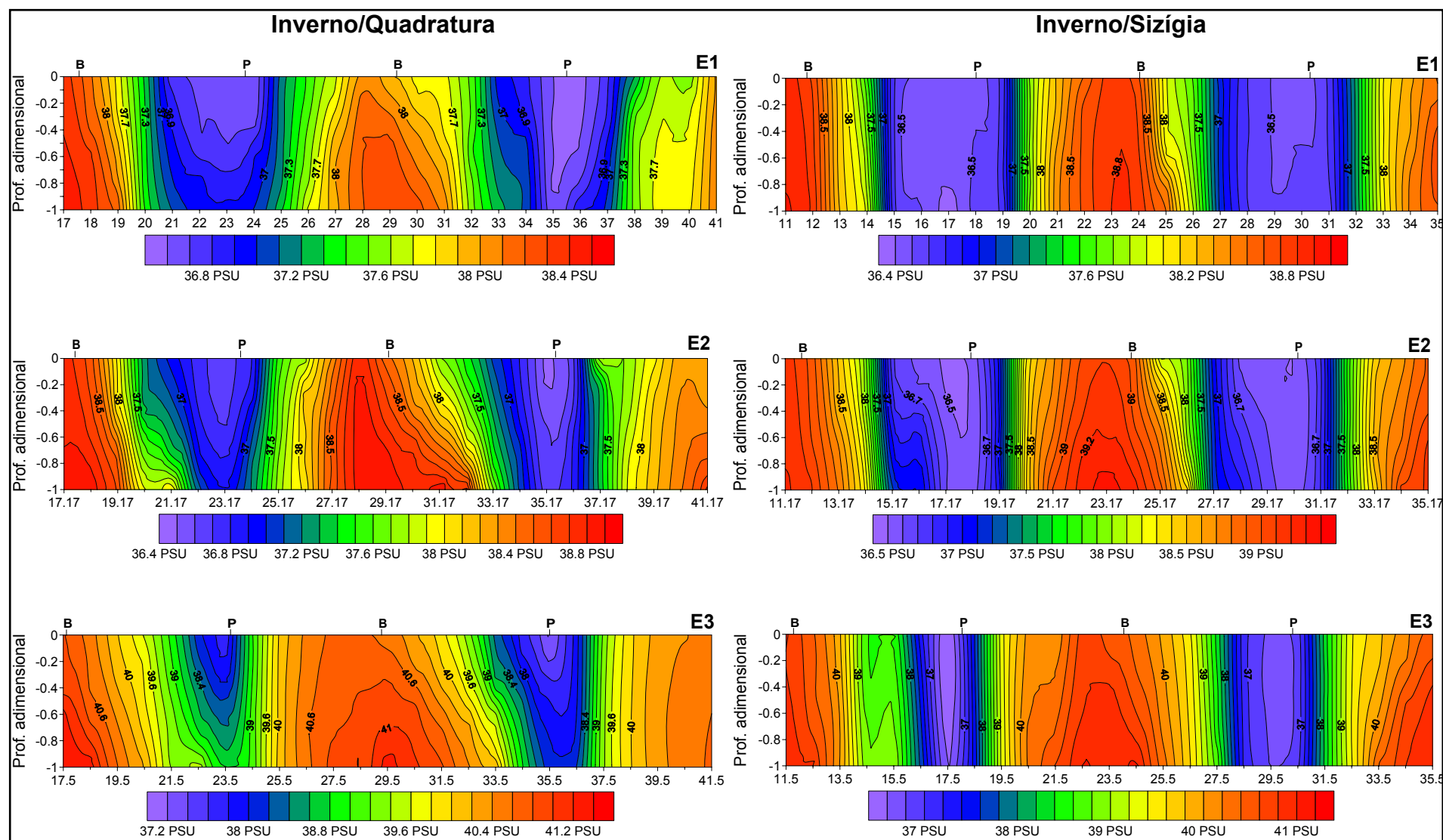


Figura 7.24. Variação temporal da salinidade (PSU) na coluna d'água do canal Pisa Sal nas estações E1, E2 e E3 no período de inverno durante as marés de quadratura e sizígia.

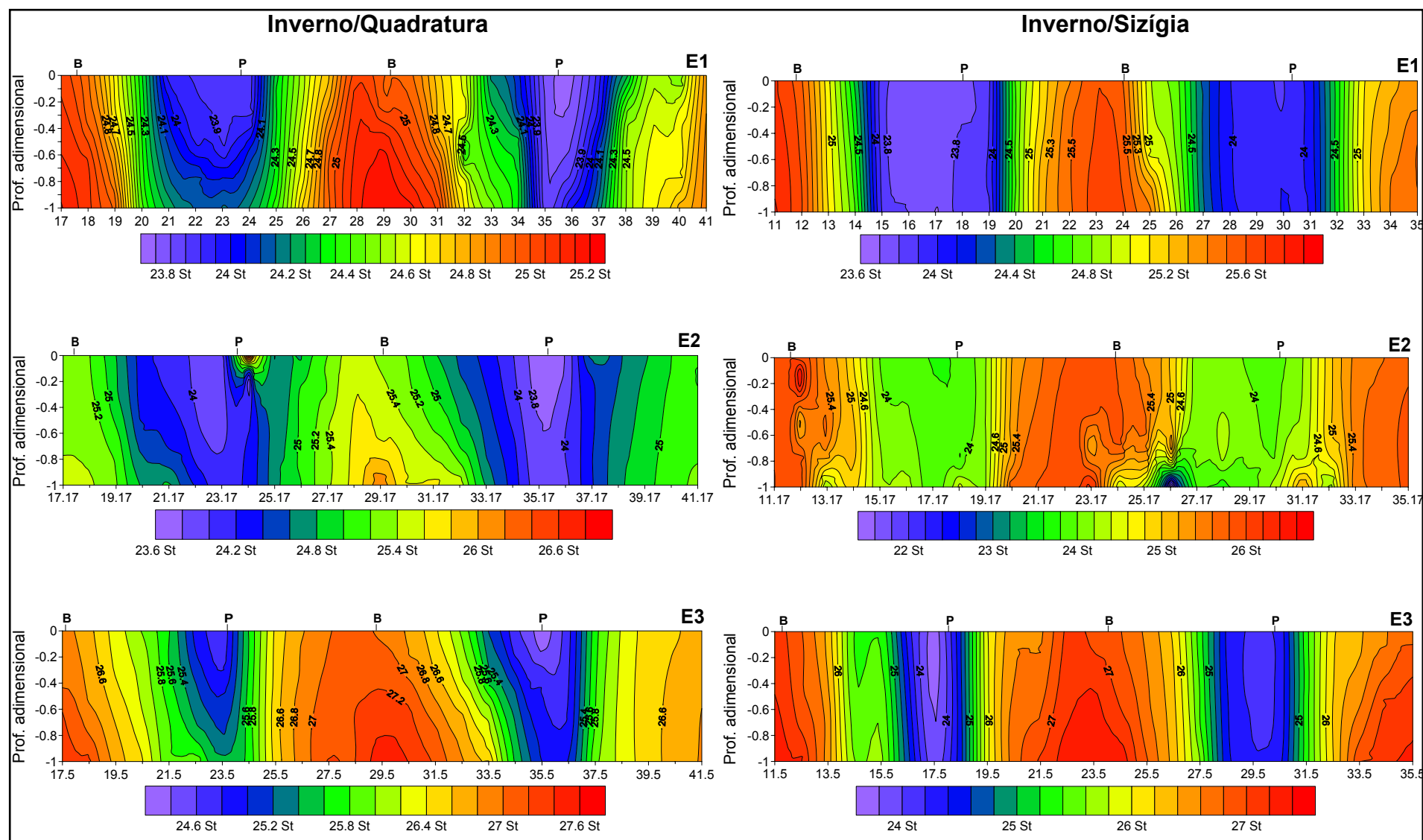


Figura 7.25. Variação temporal de Sigma-t (St) na coluna d'água do canal Pisa Sal nas estações E1, E2 e E3 no período de inverno durante as marés de quadratura e sizígia.

7.4.3.2 Verão

A temperatura média entre as estações varia de 27,48 e 28,43 °C registrada na E3 (Tabela 7.4). As temperaturas mínimas e máximas são 27,01 °C (E1) e 29,25 °C (E3). As temperaturas durante a quadratura são maiores que durante a sizígia e apresentam o seguinte comportamento: na quadratura, a temperatura aumenta canal acima, enquanto, na sizígia, são aproximadamente constantes.

A temperatura mostra variações entre as marés de quadratura e sizígia. Durante a quadratura, principalmente, nas estações E1 e E3 e próximo às estofas de vazante (14 e 18h), a temperatura mostra fraco gradiente que diminui em direção ao fundo do canal, enquanto na sizígia as isotermas mostram valores constantes da superfície ao fundo. Apenas na E1, durante a sizígia de verão, ocorre um núcleo de temperatura mais baixa próximo ao fundo (30 h) (Figura 7.26).

A salinidade média varia entre 39,01 PSU (E1) e 41,90 PSU (E3), com valores mínimos de 37,73 PSU (E1) e máximos de 43,18 PSU (E3), o que indica aumento da salinidade canal acima. Este aumento ocorre tanto nas marés de quadratura e quanto nas de sizígia (Tabela 7.4).

As isopletras de salinidade de todas as estações mostram na quadratura isohalinas com fraco gradiente que aumenta em direção ao fundo, seja durante as baixa-mares ou preamares. Nas marés de sizígia, as isopletras de salinidade mostram isohalinas verticalizadas, exceto nas baixa-mares da estação E3 (Figura 7.27).

A densidade média varia de 25,47 Sigma-t (E1) a 27,32 Sigma-t (E3), com densidade mínima de 23,82 Sigma-t (E3) e máxima de 28,83 Sigma-t (E3) (Tabela 7.4). As isopletras de densidade apresentam o mesmo padrão de isolinhas e características das isopletras de salinidade (Figura 7.28). Da mesma forma que a salinidade, ocorre um aumento da densidade canal acima, tanto durante a quadratura quanto na sizígia.

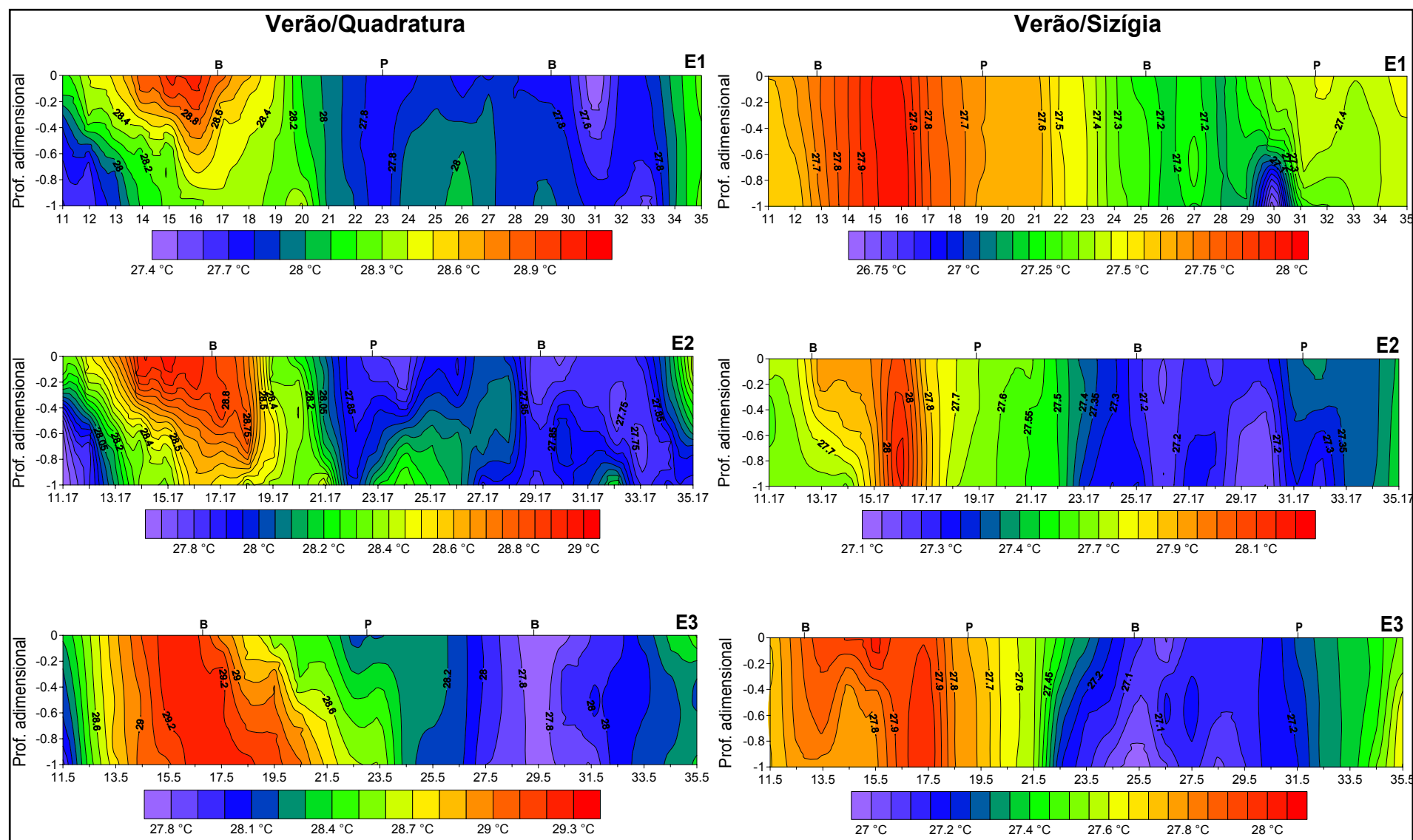


Figura 7.26. Variação temporal da temperatura (°C) na coluna d'água do canal Pisa Sal nas estações E1, E2 e E3 no período de verão durante as marés de quadratura e sizígia.

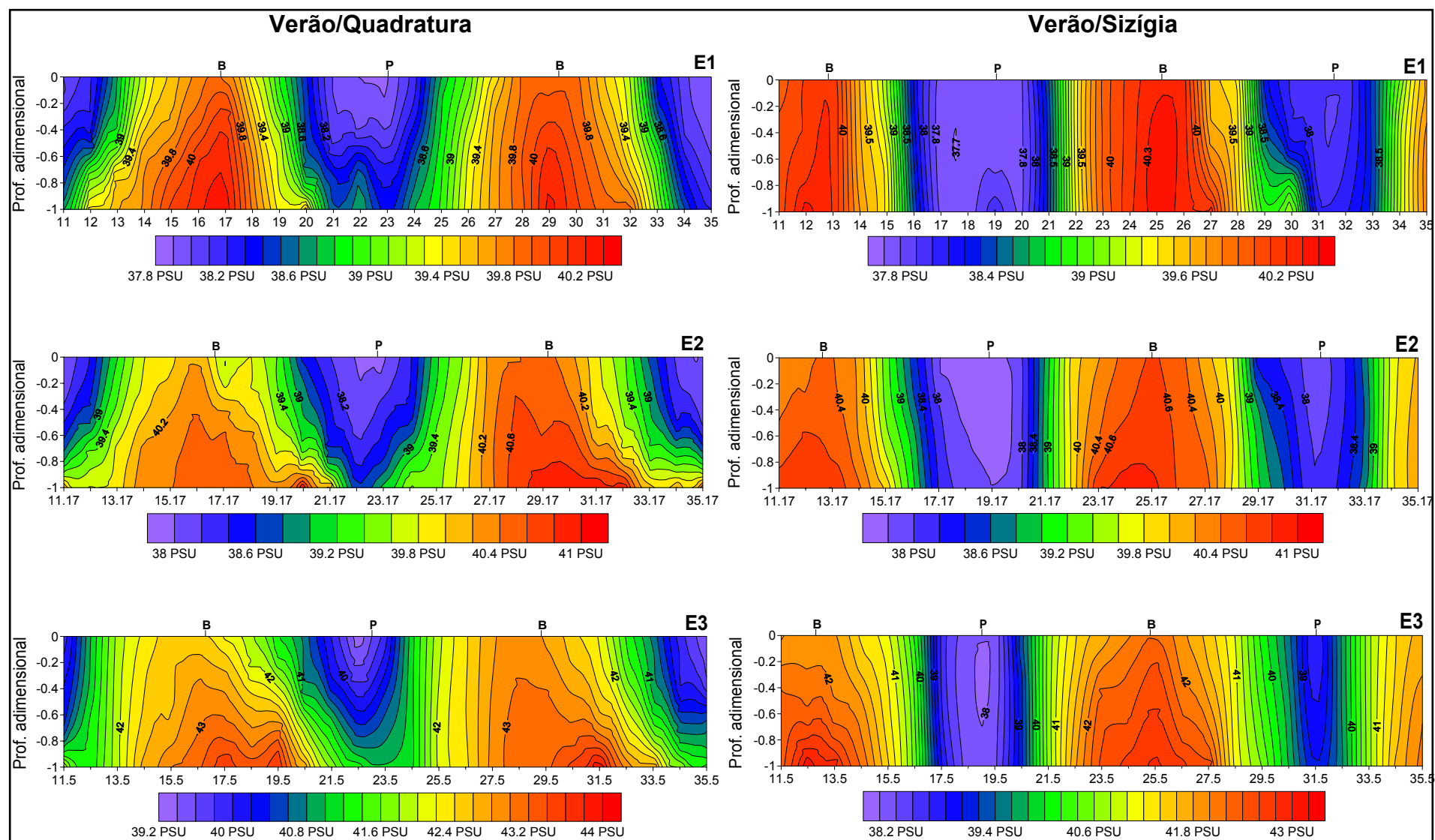


Figura 7.27. Variação temporal da salinidade (PSU) na coluna d'água do canal Pisa Sal nas estações E1, E2 e E3 no período de verão durante as marés de quadratura e sizígia.

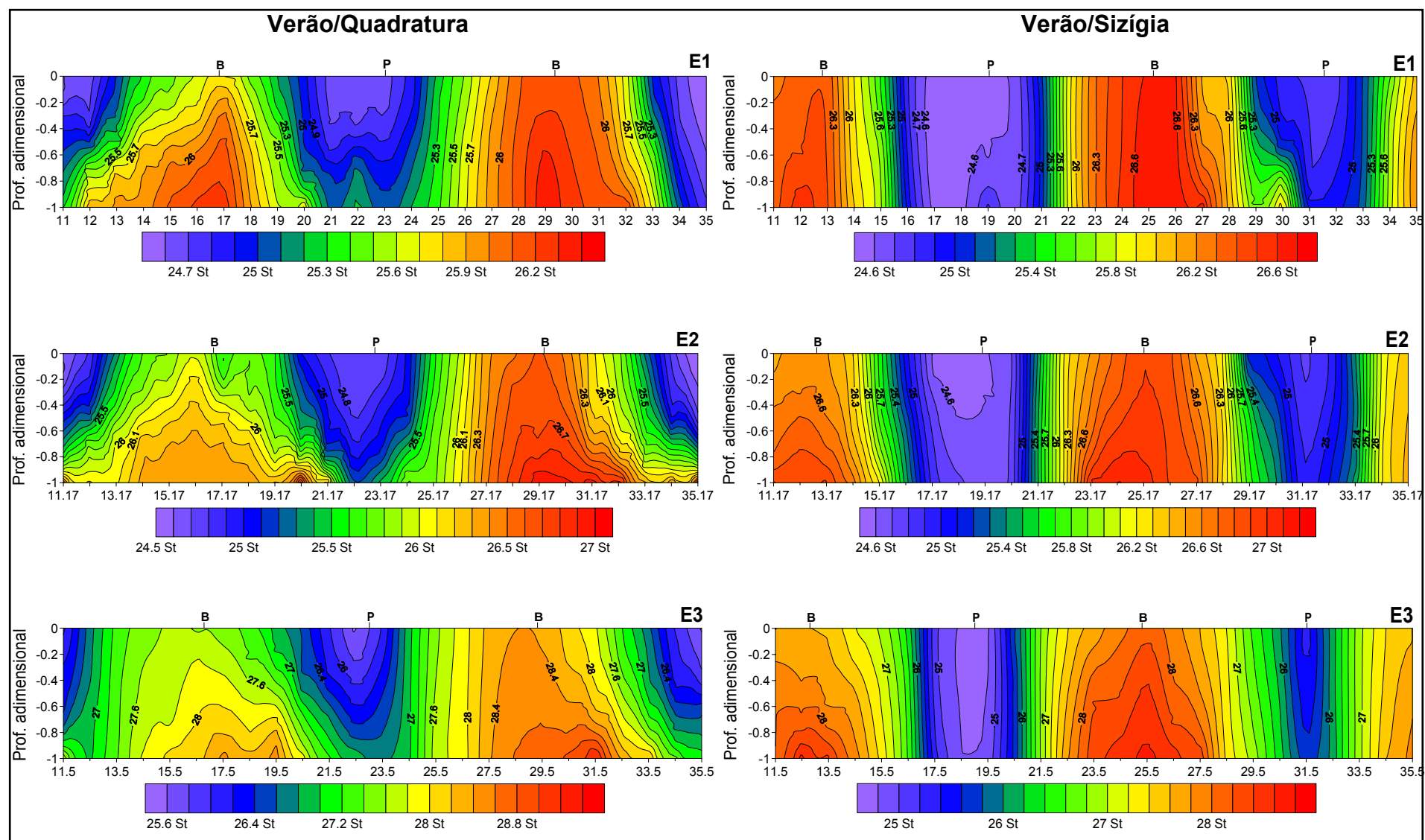


Figura 7.28. Variação temporal de Sigma-t (St) na coluna d'água do canal Pisa Sal nas estações E1, E2 e E3 no período de verão durante as marés de quadratura e sizígia.

7.5 DISCUSSÕES

De uma forma geral, o comportamento da componente longitudinal da velocidade (u) apresenta-se simétrica, com ocorrências de correntes com baixos índices de assimetria. A quadratura de inverno apresenta-se fracamente assimétrica ao longo de todo canal, enquanto a sizígia mostra variabilidade entre simétrica (boca) a fracamente assimétrica (cabeceira). Na quadratura de verão, as correntes variam de simétrica (boca) a fracamente assimétrica (cabeceira) e, na sizígia, variam de simétrica (boca) a aproximadamente simétricas (cabeceira). A figura 7.29 mostra o comportamento geral da simetria (a) e nas fases de levantamento (b).

Analisando a figura 7.29, observa-se que, somente durante a quadratura de inverno, as correntes tendem a uma assimetria e que a sizígia de verão é a fase mais simétrica. As fases de sizígia de inverno e quadratura de verão apresentam mesmo padrão de simetria com aumento da assimetria canal acima (E3). A cabeceira do canal (E3) é a região que apresenta relativamente o maior grau de assimetria na maioria das fases estudadas, exceto na sizígia de verão. Assim, a tendência de simetria da maré na área reflete a descarga fluvial desprezível e o predomínio da co-oscilação da maré.

		fracamente assimétrico aproximadamente simétrico simétrico		
a		iq	is, vq	vs
b	E1 (boca)	iq is, vq, vs		
	E2 (intermediária)	iq is, vq, vs		
	E3 (cabeceira)	iq, is, vq vs		

Figura 7.29. Variação geral da simetria da maré (a) e durante as fases de levantamento ao longo do canal (b). As letras representam: iq (inverno quadratura), is (inverno sizígia), vq (verão quadratura) e vs (verão sizígia).

Miranda *et al* (2005) estudou as características hidrológicas e hidrodinâmicas do estuário do rio Curimataú localizado no litoral leste do estado do Rio Grande do Norte durante dois ciclos completos de marés de quadratura e sizígia no período de inverno (28 de abril a 9 de maio de 2001). O estuário do rio Curimataú é raso com menos de 10 metros de profundidade, marés semidiurnas ($N_F = 0,09$) e regime de

mesomaré. No passado, a cobertura de mangue foi removida para implantação de salinas, onde atualmente a carcinicultura ocupou esses espaços e promoveu também intensa supressão desta cobertura. Portanto, suas características físico-ambientais são bastante semelhantes a do sistema Pisa Sal, exceto devido à importante descarga fluvial que é incrementada pela presença dos seus tributários: os rios Cunhaú e Guaratuba. Nesse estudo, a componente u nos experimentos de quadratura mostrou assimetria entre a maré de vazante e enchente com valores máximos respectivos de 0,9 e -0,4 m/s, em que as fortes correntes de vazante estão associadas ao aumento da descarga fluvial devido às fortes chuvas nas porções inferiores da bacia de drenagem. Por outro lado, durante a maré de sizígia a componente longitudinal apresentou uma pequena assimetria com velocidades de vazante e enchente 1,1, e -0,8 m/s, respectivamente. Nesse período, foi registrada uma diminuição da descarga fluvial de 0,65 para 0,1 m³/s, conferindo essas altas velocidades ao efeito barotrópico das correntes de marés.

O comportamento das estofas de maré em relação à Tábua de Maré da DHN apresenta diferenças, de forma que, para esta análise, foi levado em consideração o posicionamento temporal das velocidades nulas ($u = 0,0$ m/s) identificadas neste estudo em relação às estofas de vazante (baixa-mar) e enchente (preamar) extraídas da tábua de maré da DHN. As marés na boca do canal em todos os levantamentos ocorrem atrasadas em média 15 a 30 minutos, entretanto tempos maiores ocorrem durante a vazante durante a sizígia de inverno (1,0 hora), bem como tempos menores ocorrem durante as enchentes de verão de quadratura (7 minutos) e verão de sizígia (0,0 minuto). Esse tempo vai aumentando em direção à cabeceira do canal, onde, na porção intermediária, esse tempo varia entre 30 e 55 minutos, porém valores maiores foram registrados durante a quadratura de inverno (1,5 hora) e tempos menores na sizígia de verão (15 minutos). Na cabeceira do canal, ocorre entre 30 e 1,42 hora, com tempo maior na sizígia de inverno (1,75 hora), bem como tempos menores na quadratura de inverno (20 minutos) e sizígia de verão (15 minutos). Essas diferenças, ocorrem devido a distância do porto de Guamaré às estações E1, E2 e E3.

A tabela 7.5 mostra as médias da componente u nas condições ambientais de inverno e verão que foram calculadas a partir dos dados da tabela 7.2 e serão utilizadas nos cálculos de transporte de sedimentos no Capítulo 9 - Transporte de sedimentos no sistema Pisa Sal. Durante o inverno, todo canal do Pisa Sal apresenta velocidade constante na ordem de 0,27 m/s, diferentemente do verão, quando as

velocidades variam ao longo do canal, mostrando maior e menor velocidade, respectivamente, na desembocadura (E1) e no meio (E2) do canal. Na cabeceira do canal, a velocidade apresenta-se ligeiramente mais elevada que na porção intermediária do canal. A diferença relativa entre as velocidades durante o verão é da ordem de 0,02 a 0,01 m/s. Estas variações nas velocidades médias devem-se às discrepâncias entre as baixas velocidades durante a maré de quadratura (Tabela 7.2).

Tabela 7.5. Velocidades médias da componente longitudinal (u) nas estações para as condições ambientais de inverno e verão no sistema Pisa Sal, Galinhos-RN.

Período	E1	E2	E3
	m/s		
Inverno	0,27	0,27	0,27
Verão	0,26	0,24	0,25

A tabela 7.6 mostra as velocidades médias de vazante e enchente nas marés de quadratura e sizígia durante o inverno e verão, de forma que a velocidade média de vazante da componente u , em todas as fases deste estudo, é maior que as velocidades de enchente. As velocidades, durante o inverno, são maiores que durante o verão, exceto na maré enchente de sizígia em que as correntes são iguais.

Tabela 7.6. Velocidades médias de vazante e enchente nas marés de quadratura (qd) e sizígia (sz) durante o inverno e verão no canal do Pisa Sal, Galinhos/RN.

Maré	Vazante (m/s)			Enchente (m/s)		
	qd	sz	qd/sz	qd	sz	qd/sz
Inverno	0,22	0,38	0,30	0,17	0,30	0,24
Verão	0,19	0,34	0,27	0,16	0,30	0,23

Da mesma forma que as velocidades médias, as velocidades máximas médias de vazante, em todas as fases de levantamento, são maiores que as de enchente. Entretanto, o mesmo não ocorre, quando se confrontam as velocidades máximas médias de inverno com as de verão, quando apenas a velocidade máxima média durante a sizígia de verão é maior que a de quadratura de inverno (Tabela 7.7). As velocidades máximas de vazante ocorrem 1,0 a 2,3 horas (média de 1,5 horas) após a

estofa de enchente, enquanto as máximas de enchente ocorrem 3,5 a 6,0 horas (média 4,6 horas) após a estofa de vazante.

Tabela 7.7. Velocidades máximas médias de vazante e enchente nas marés de quadratura (qd) e sizígia (sz) durante o inverno e verão no canal do Pisa Sal, Galinhos/RN.

Maré	Vazante (m/s)			Enchente (m/s)		
Período	total	qd	sz	total	qd	sz
Inverno	0,81	0,64	0,98	0,69	0,47	0,91
Verão	0,75	0,47	1,02	0,53	0,37	0,68

As velocidades máximas médias da componente u , durante o inverno no canal do Pisa Sal, são bastante semelhantes às do estuário do Curimataú (Miranda *et al.*, 2005), nas quais, durante a quadratura, as correntes de vazante e enchente são, respectivamente, 0,64 e 0,47 m/s, enquanto, durante a maré de sizígia, são 0,98 e 0,91 m/s (Tabela 7.7).

As direções das velocidades longitudinais de vazante e enchente orientam-se concordantes com a direção do canal, nas seguintes direções respectivas: NW-NNW e SE-SSE, refletindo a orientação regular da batimetria.

De uma forma geral, as velocidades residuais (u_a) no inverno indicam predominância para vazante, enquanto, no verão, mostram tendência tanto para vazante quanto para enchente, a depender da fase da maré. No inverno (quadratura e sizígia), as correntes de vazante apresentam valores de 0,02 m/s, exceto na estação E2, cuja velocidade residual é nula. No verão, apresenta um padrão heterogêneo, em que predominam as correntes de vazante somente na boca do canal, durante a quadratura (0,01 m/s), e, na cabeceira do canal, durante a sizígia (0,01 m/s). Na porção intermediária do canal, a velocidade residual apresenta-se nula. A velocidade u_a mostra tendência para enchente na boca do canal durante a sizígia (0,01 m/s), na porção intermediária (0,01 m/s) e cabeceira durante a quadratura (0,02 m/s). Na porção intermediária, durante a sizígia, a velocidade u_a é nula (Figura 7.30).

A análise dos dados do sensor S4, instalado na margem direita do canal do Pisa Sal, em frente à estação de bombeamento da Camarus Aquacultura do Nordeste Ltda., indica que a atividade de bombeamento de água do Pisa Sal para abastecimento dos viveiros provoca um rebaixamento da linha d'água na ordem de 0,25 a 0,30 m, cujo mecanismo de sucção causa intensa turbulência no leito do canal, colocando em

suspensão os sedimentos de fundo, e conseqüentemente, contribuindo para o processo de erosão do seu leito.

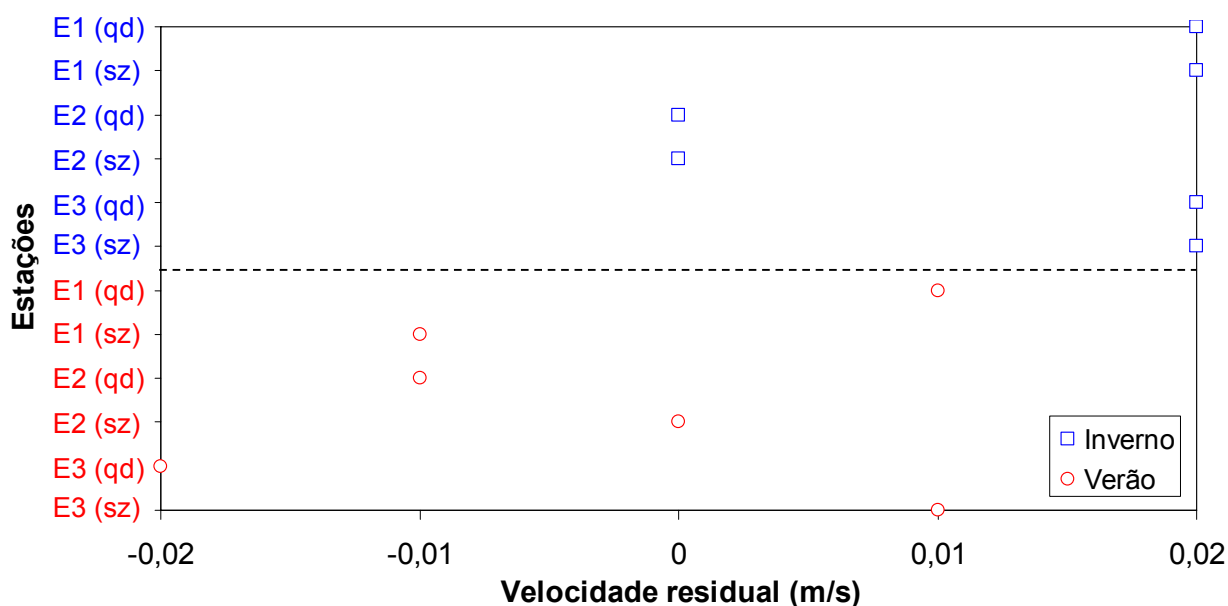


Figura 7.30. Velocidades residuais (u_a) nas estações E1 a E3 nas condições ambientais de inverno e verão nas marés de quadratura (qd) e sizígia (sz). Velocidades positivas indicam vazante e negativas indicam enchente.

A figura 7.31 apresenta as direções e velocidades médias de vazante e enchente da componente u do canal do Pisa Sal e dos canais de despesca (CDs) da carcinicultura. A velocidade de vazante e enchente nas margens do canal é inferior à do centro do canal, como observado na estação E4. Esta estação é a única que apresenta a velocidade de vazante ligeiramente inferior à de enchente.

A velocidade no CD1 (E5) é superior a das margens e ligeiramente inferior à do centro do canal do Pisa Sal, a qual se deve a: dimensões (comprimento, largura e profundidade), configuração geométrica, gradiente e orientação em relação à foz. A velocidade do CD2 (E6) é, aproximadamente, igual à da margem do Pisa Sal (Figura 7.31).

A temperatura, a salinidade e a densidade médias da coluna d'água durante o verão são mais elevadas que durante o inverno, cujos maiores valores são observados durante as marés de quadratura em todas as estações. A figura 7.32 mostra que estas diferenças aumentam canal acima, principalmente a temperatura e a salinidade, indicando um comportamento semelhante ao padrão de circulação inversa, segundo a classificação de estuário proposta por Cameron e Pritchard (1963).

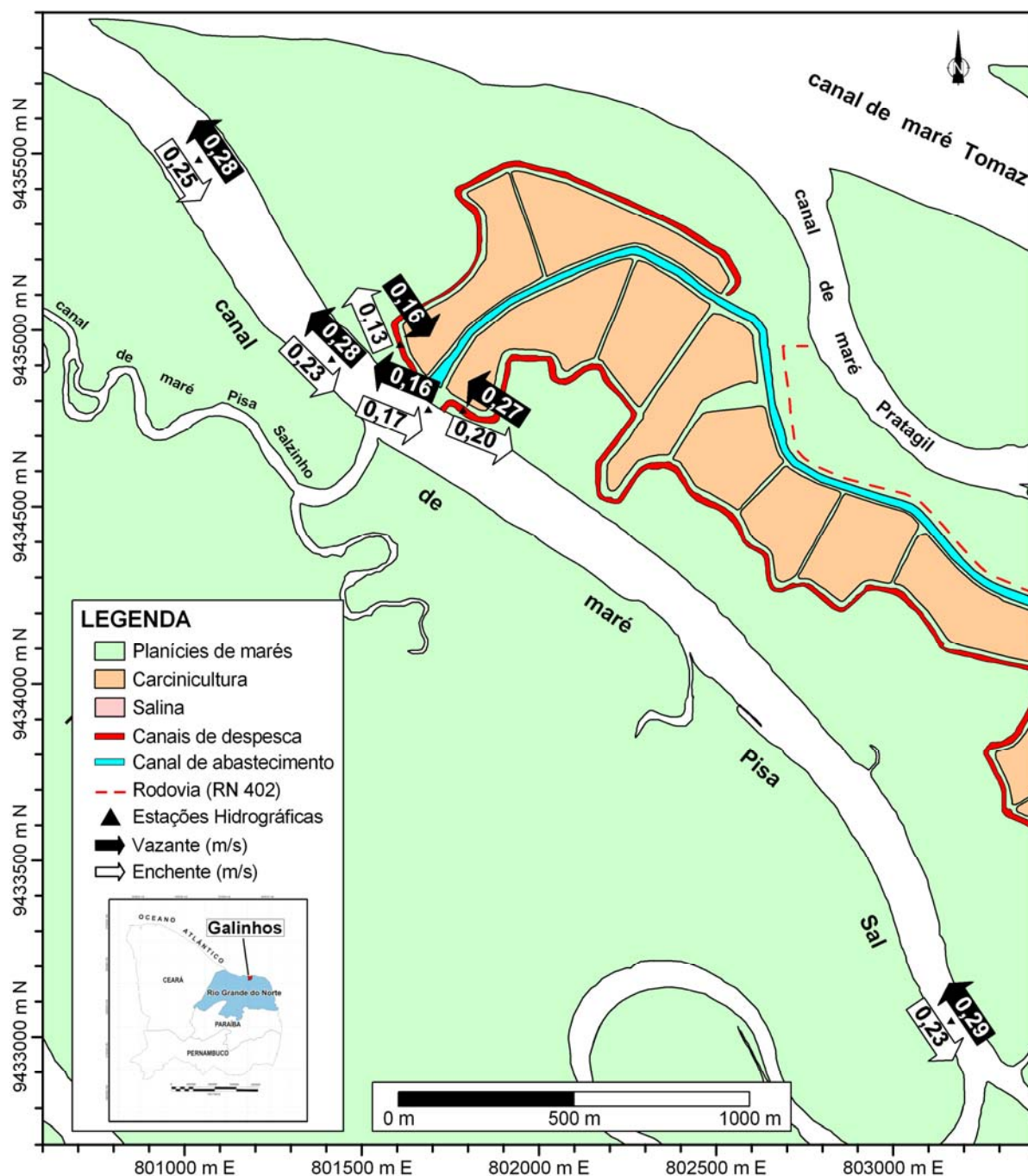


Figura 7.31. Mapa das velocidades médias de vazante e enchente da componente longitudinal (u) nas estações no canal do Pisa Sal (E1 a E4) e canais de drenagens (E5 e E6), Galinhos/RN.

Por sua vez, a variação vertical das propriedades termohalinas mostra características distintas. Nesse sentido, a temperatura varia entre alta e baixa no inverno, enquanto, no verão, ocorre predominância de valores altos na superfície. Ao longo de todo ano, a salinidade é mais alta no fundo, com valores mais elevados observados durante o verão. No inverno, a salinidade mostra significativas diferenças com relação às marés de quadratura e sizígia, chegando a apresentar em média na quadratura salinidade 2,2 vezes maior (Tabela 7.8).

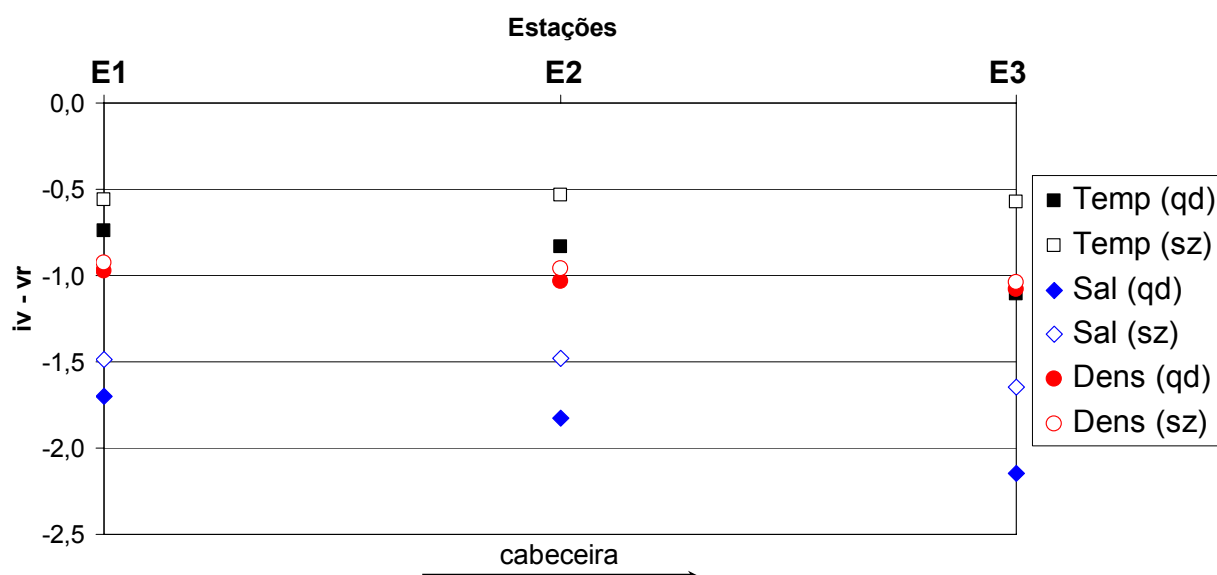


Figura 7.32. Variação longitudinal da diferença das propriedades termohalinas (temperatura, salinidade e densidade) entre o inverno e verão (iv – vr) durante as marés de quadratura e sizígia. O sinal negativo representa valores mais altos durante o verão.

Tabela 7.8. Diferença entre a temperatura, a salinidade e a densidade médias da superfície da água e no fundo (Ss - Sf) durante o inverno e verão nas marés de quadratura (qd) e sizígia (sz). O sinal negativo indica que a salinidade no fundo é mais alta que na superfície.

ÉPOCA	EST.	Maré	Temperatura	Salinidade	Densidade
			°C	PSU	Sigma-t
Inverno	E1	Qd	-0,02	-0,26	-0,21
		Sz	0,00	-0,09	-0,09
	E2	Qd	0,04	-0,40	-0,21
		Sz	-0,03	-0,24	0,17
	E3	Qd	-0,04	-0,59	-0,45
		Sz	0,07	-0,28	-0,25
Verão	E1	Qd	0,14	-0,53	-0,47
		Sz	0,06	-0,18	-0,18
	E2	Qd	0,08	-1,09	-0,87
		Sz	0,05	-0,29	-0,26
	E3	Qd	-0,08	-1,14	-0,85
		Sz	0,05	-0,46	-0,38

A figura 7.33 mostra que as isohalinas em todos os períodos estudados aumentam em direção ao fundo e um gradiente salino canal abaixo é estabelecido, que indica um comportamento semelhante ao padrão de circulação inversa de estuários.

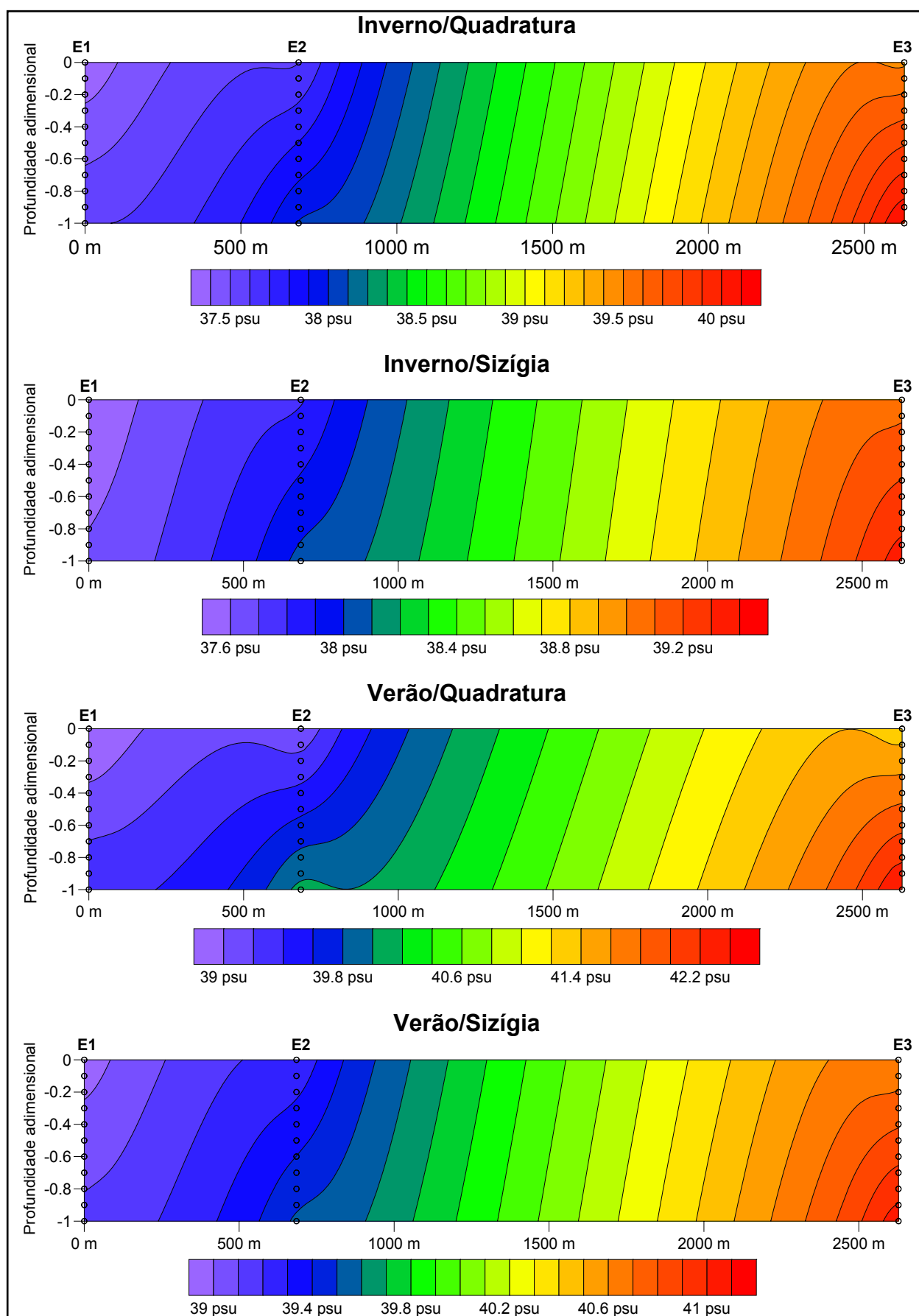


Figura 7.33. Perfil longitudinal da salinidade no canal Pisa Sal no inverno e verão e nas marés de quadratura e sizígia.

A alta evaporação, o descarte de efluentes das salinas e a carcinicultura, além da ausência de contribuição fluvial são os principais fatores responsáveis pela variação longitudinal e vertical da salinidade. (Tabela 7.8).

A co-oscilação da maré é o fenômeno responsável pelo transporte de sal canal acima em todos os períodos e estações estudadas, em que a maré de enchente é responsável pela redução da salinidade. A região de desembocadura apresenta as menores variações, enquanto, na cabeceira, ocorre um aumento significativo (Figura 7.34).

As altas salinidades que ocorrem na quadratura de verão são conseqüências, também, das pequenas amplitudes de marés e da assimetria de duração que não conseguem renovar suficientemente a água ao logo do canal. A influência da assimetria no verão é facilmente exemplificada na cabeceira onde o ciclo de maré enchente leva entre 6,63 a 7,00 horas para ocorrer determinando um processo lento de renovação da água, e conseqüentemente, contribuindo para aumento de salinidade.

A precipitação média total para os quatro meses de inverno (março a junho) para os 26 meses levantados na estação meteorológica instalada na Camarus totaliza 642,8 mm (Figura 4.10, Capítulo 4 Meteorologia da Região Adjacente ao Sistema Pisa Sal), que representa um quantitativo baixo, característico da região, e chega ao canal por precipitação direta e/ou por escoamento superficial, contribuindo também para a insignificante redução da salinidade.

Um parâmetro adimensional que representa a fração do fluxo de sal estuário acima gerado pela maré (ν), estabelecido por Hansen e Rattray (1966), permite estimar a percentagem relativa da participação dos processos advectivo e difusão turbulenta neste fluxo. O parâmetro ν , foi calculado a partir de uma equação do segundo grau deduzida por Hansen & Rattray (1966), que o correlaciona aos parâmetros estratificação ($\delta S/\bar{S}$) e circulação (u_s/u_f). Uma vez que ν varia entre 0 e 1, na condição de $\nu = 0$, essa equação passa a representar o transporte de sal gerado exclusivamente por difusão turbulenta. Essa equação somente tem solução no campo real, se o termo 32 for desprezado, de forma que $u_s/u_f = 0$ ou $u_s/u_f = 1,5$ (Equação 7.6).

$$32 + 76 \left(\frac{u_s}{u_f} - \frac{3}{2} \right) + \frac{152}{3} \left(\frac{u_s}{u_f} - \frac{3}{2} \right)^2 = 0 \dots\dots\dots 7.5$$

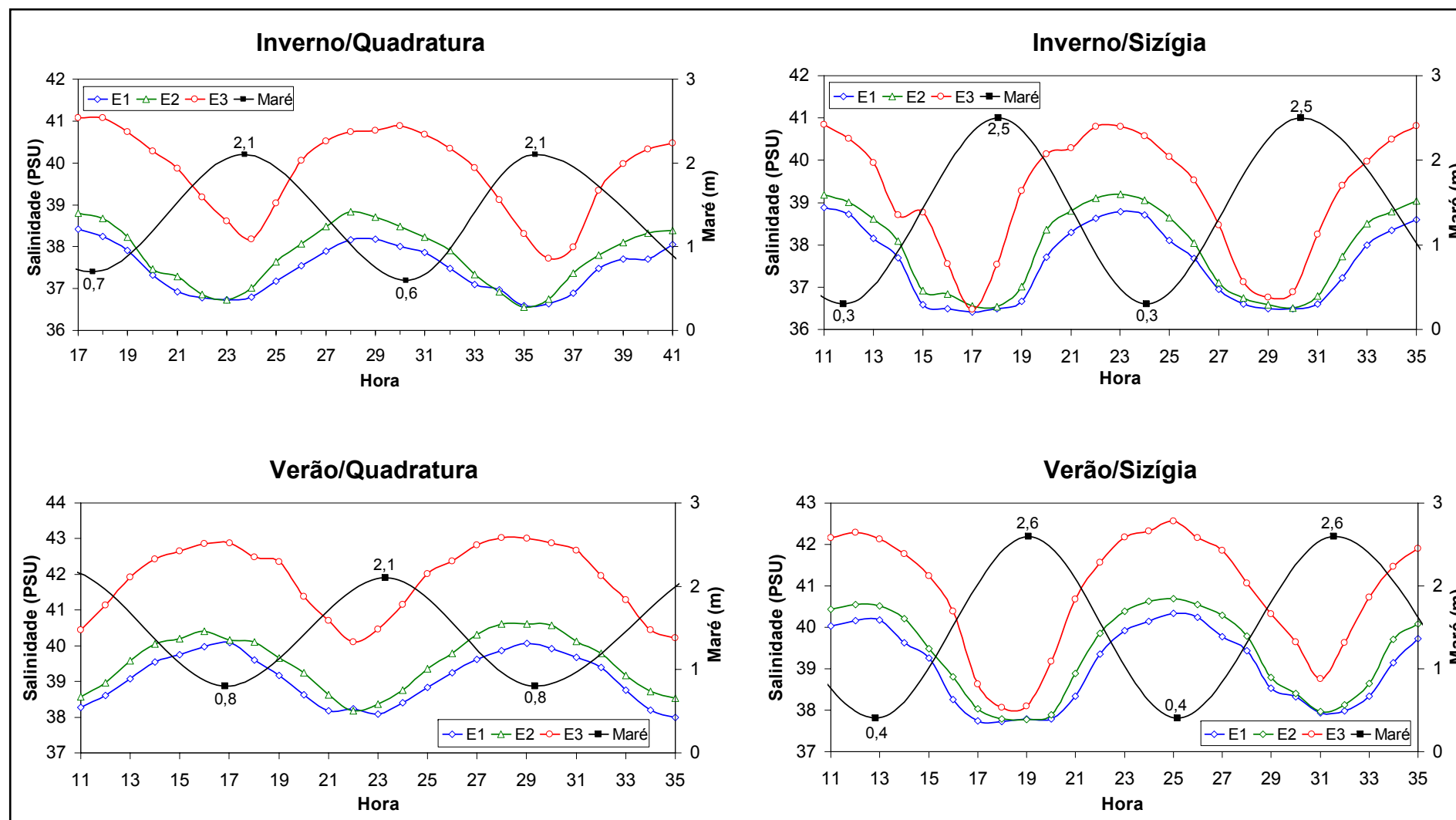


Figura 7.34. Variação da salinidade em relação à co-oscilação da maré nas estações E1, E2 e E3 nos períodos de inverno e verão, durante as marés de quadratura e sizígia.

A estimativa do percentual relativo da participação dos processos advectivo e difusão turbulenta no parâmetro ν é definida pela equação 7.5.

$$\nu = \frac{\Phi_3}{\Phi_2 + \Phi_3} \dots\dots\dots 7.5$$

onde: Φ_2 é o fluxo devido ao transporte advectivo de sal estuário acima e Φ_3 é o fluxo devido à difusão de sal pela maré estuário acima.

O parâmetro ν varia entre 0 a 1, de forma que quando tende a 1 (um) predomina Φ_3 e o estuário classifica-se como bem misturado. Por outro lado, se ν tende a 0 (zero) predomina Φ_2 e o estuário é classificado como bem estratificado. A tabela 7.9 apresenta os valores de ν para as imagens de inverno e verão nas marés de quadratura e sizígia do canal Pisa Sal que ocorrem nesse intervalo e os percentuais relativos do transporte advectivo (Φ_2) e difusão turbulenta (Φ_3).

Tabela 7.9. Fração do transporte horizontal de sal causado pela maré (ν) nas estações E1, E2 e E3 nos períodos de inverno (iv) e verão (vr) durante as marés de quadratura (qd) e sizígia (sz).

Campanhas	ν	Φ_2 (%)	Φ_3 (%)
E1 (vr, sz)	1,00	0	100
E2 (iv, qd)	0,96	4	96
E2 (iv, sz)	0,99	1	99
E2 (vr, qd)	0,98	2	98
E2 (vr, sz)	0,92	8	92
E3 (iv, sz)	1,00	0	100
E3 (vr, qd)	1,00	0	100

Portanto, o canal Pisa Sal é um canal de maré com características hipersalinas, comportamento de um estuário inverso (negativo), verticalmente bem misturado, forçado, predominantemente, pela maré. O processo de difusão turbulenta da maré é responsável pelo transporte de sal e provoca a redução da salinidade ao longo do ano.

Por fim, as velocidades médias da componente u das correntes de marés e a salinidade foram utilizadas na quantificação do transporte de sedimentos de fundo e em suspensão, apresentados no Capítulo 9 - Transporte de Sedimentos no Sistema Pisa Sal.

8 CARACTERIZAÇÃO DA EROSÃO NO SISTEMA PISA SAL

Neste capítulo, serão apresentados os resultados do monitoramento topográfico do sistema Pisa Sal, que tem a finalidade de identificar e quantificar a variação morfodinâmica, em escala espaço-temporal nos canais naturais (Pisa Sal, Volta do Sertão e Pisa Salzinho) e escavados (CDs). Para isto, foram escolhidos locais com forte presença dos fenômenos de erosão.

8.1 MONITORAMENTO TOPOGRÁFICO

Foram selecionados 13 perfis, dentre os quais 6 estão localizados nas margens dos canais de marés - rios Pisa Sal (P7, P11 e P12), Volta do Sertão (P9 e P10) e Pisa Salzinho (P8) e 7 perfis localizados nos canais de despesca (CDs) da empresa de criação de camarão em cativeiro - Camarus Aquacultura do Nordeste: 5 perfis no CD1 (P3 ao P6 e P13) e 2 perfis no CD2 (P1 e P2) (Figura 8.1). Os CDs apresentam forma aproximada trapezoidal ou triangular (Figura 8.2), com extensão de 4.900 m (CD1) e 1.700 m (CD2), largura de 10 a 15 m e profundidade média de 1,2 a 1,5 m (Figura 8.1).

No início de cada perfil, foi monumentado um marco de concreto. Nos CDs, estes marcos estão localizados na parte superior dos taludes dos viveiros. Posteriormente, foram obtidas as coordenadas UTM de todos os marcos, utilizando o sistema de DGPS pelo método estático (modelo ProMarck 2 - Ashtech) a partir do RN de primeira ordem do IBGE nº SB 241108 com cota de 28,8 m e coordenadas UTM 802804,917 m E e 9422032,083 m N (Zona 24 M) (Figura 8.3A). Foi utilizado o datum de referência WGS 84. Este método permite uma precisão horizontal de 0,005 m + 1 ppm e precisão vertical de 0,01 m + 2 ppm.

O monitoramento topográfico foi realizado durante o período de 27 meses (junho de 2004 a agosto de 2006), ao longo de perfis perpendiculares aos canais, numa periodicidade mensal e sempre durante a baixa-mar das marés de sizígia. Este procedimento foi adaptado da metodologia utilizada em perfis de praia que usa nível, régua e trena desenvolvida por Birkemeier (1981). Este método é utilizado em praticamente todos os trabalhos de monitoramento da erosão costeira, como, por exemplo: os estudos sobre a dinâmica costeira na região de Galinhos e na região de Macau, litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte desenvolvidos por Chaves (2006), Lima (2004) e Lima *et al.* (2003).

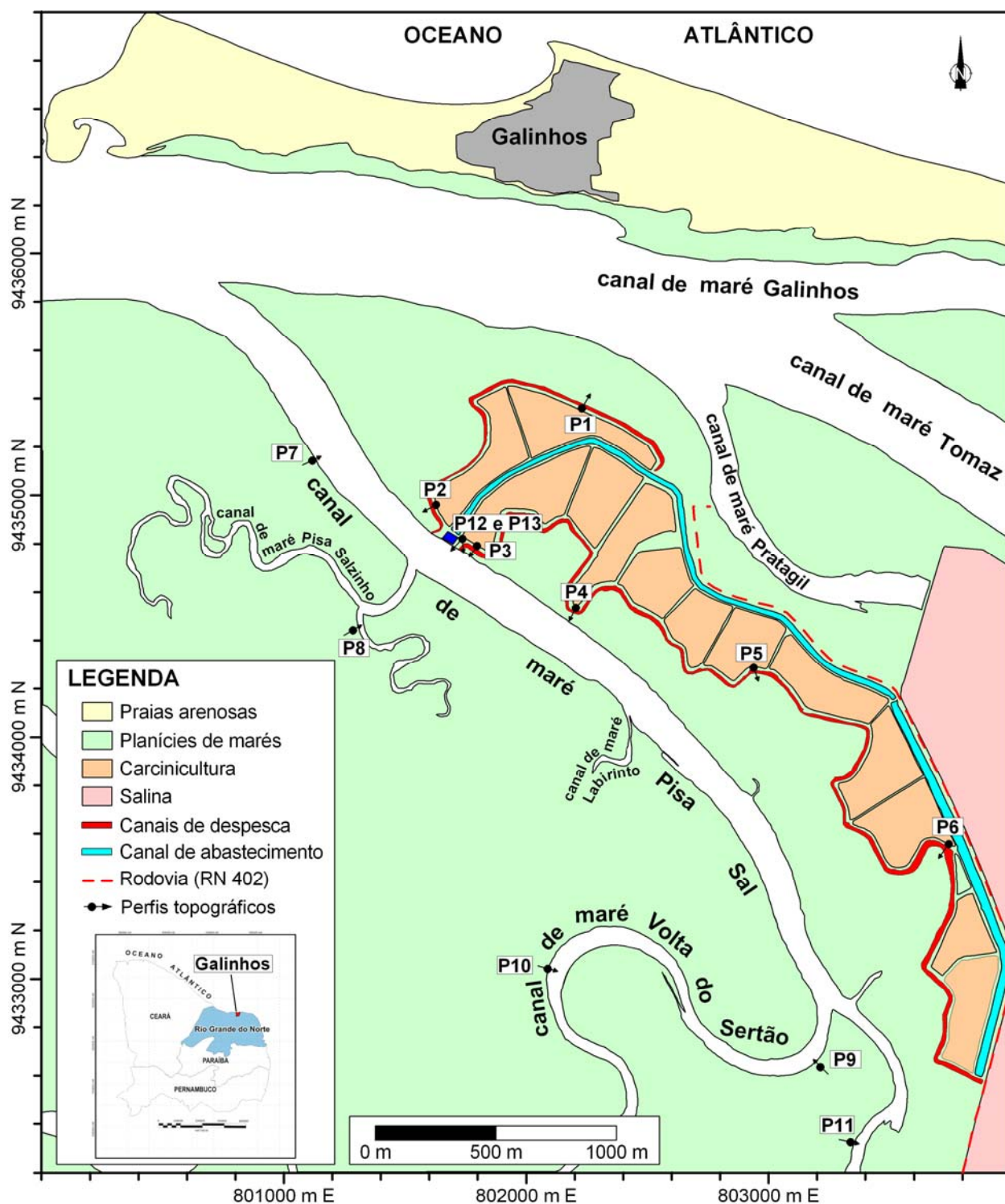


Figura 8.1. Mapa de localização dos perfis topográficos (P) no sistema Pisa Sal, Galinhos-RN.



Figura 8.2. Aspecto ambiental dos locais dos perfis topográficos no sistema Pisa Sal e canais de despesca (CDs). Os perfis de P1 a P6 e P13 estão localizados nos CDs, enquanto os perfis de P7 a P12 estão localizados no sistema Pisa Sal. As linhas tracejadas vermelha e laranja (P12) representam, aproximadamente, a orientação do perfil.



Figura 8.3. Sistema DGPS modelo ProMarck 2/Ashtech (A), estação total modelo Elta 50/Trimble Zeiss (B) e prisma (C).

Entretanto, este estudo utilizou um Medidor Eletrônico de Distância (MED), tipo Estação Total modelo Elta 50 (Trimble Zeiss) (Figura 8.3B e C) que opera emitindo feixes de microondas ($1 < \lambda < 10$ cm), permitindo uma precisão linear de $5 \text{ mm} + 3 \text{ ppm}$ e uma precisão angular de $5''$. Os perfis foram amarrados em pontos notáveis no terreno a partir do ângulo horizontal entre eles, de forma a permitir a mesma orientação da linha de visada ao longo de todo o estudo. Mensalmente, foram coletadas as diferenças de níveis e as distâncias horizontais entre os pontos que apresentaram variação morfológica, permitindo a confecção dos respectivos perfis topográficos. Também foi determinada a variação temporal da posição da linha d'água no momento do levantamento para posterior redução da maré.

8.2 ANÁLISE DOS PERFIS TOPOGRÁFICOS

O monitoramento topográfico realizado nos canais de marés e CDs permitiu entender o comportamento morfodinâmico no tempo e no espaço, associado à presença dos fenômenos de erosão e deposição. Para melhor visualização e compreensão das variações morfológicas ocorridas nos perfis, serão apresentados graficamente dados relativos ao período de inverno e verão, a saber: junho/04, dezembro/04, junho/05, dezembro/05 e agosto/06. Assim, serão apresentados a seguir os resultados deste monitoramento.

8.2.1 Sistema Pisa Sal

A morfologia do terreno ao longo dos perfis monitorados durante os 27 meses apresentou variações decorrentes dos eventos erosivos e deposicionais, associados à ação das correntes de marés (enchente e vazante), das ondulações geradas pelos ventos, das chuvas e do transporte eólico.

O perfil P7 está localizado na margem esquerda e próximo à foz do rio Pisa Sal (Figuras 8.1). Apresenta uma extensão de 27 metros, com uma superfície plana de aproximadamente 15 metros de comprimento que termina numa escarpa de erosão com altura de 0,60 m, servindo de limite à ação das marés de sizígia (Figura 8.2). Este ponto caracteriza o limite externo da zona de intermaré que apresenta uma relação v/h de 1:8. O perfil mostra erosão a partir da escarpa de erosão, sendo mais evidenciada no período de junho de 2004 a dezembro de 2004 (Figura 8.4).

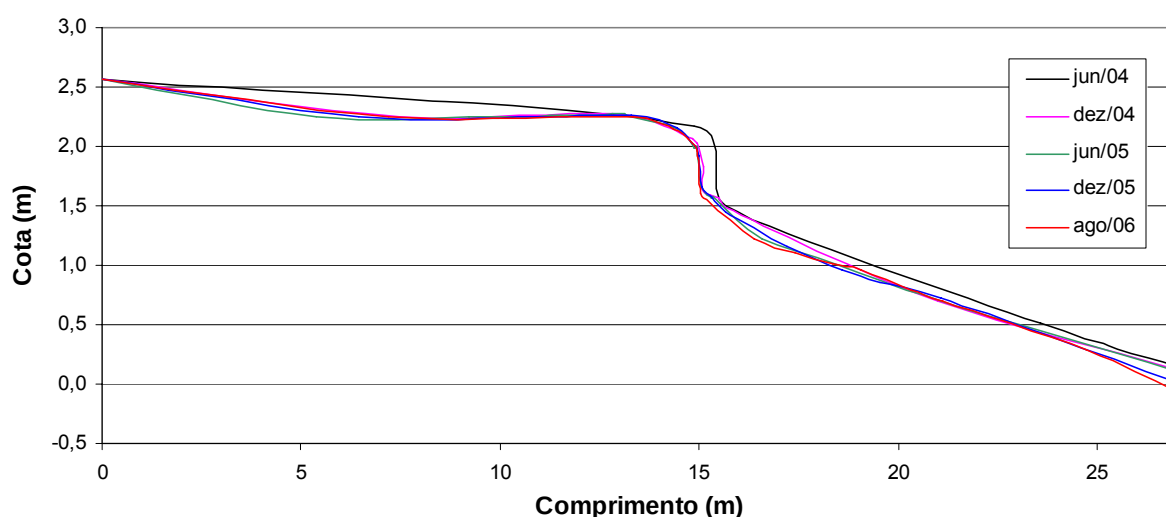


Figura 8.4. Perfil topográfico P7 monitorados no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).

O perfil P8 está localizado no canal Pisa Salzinho (Figura 8.1) iniciando no topo plano de uma planície de maré e cruza um canal de maré, atingindo 40 m de extensão. A transição da planície de maré para o canal de maré é definida por uma suave escarpa erosiva (Figura 8.2). Fenômenos de erosão estão bem marcados na margem esquerda do canal, onde se observa um progressivo e contínuo recuo do perfil em direção à planície de maré. Por outro lado, na margem direita do canal, ocorrem contínuos processos de deposição, formando um banco arenoso que migrou ao longo de todo período monitorado (Figura 8.5). Em resposta à hidrodinâmica estuarina atuante no local, o talvegue mostra claramente uma migração de 5,8 metros em direção à planície de maré (SW) no período entre junho/04 e agosto/06 (Figura 8.5).

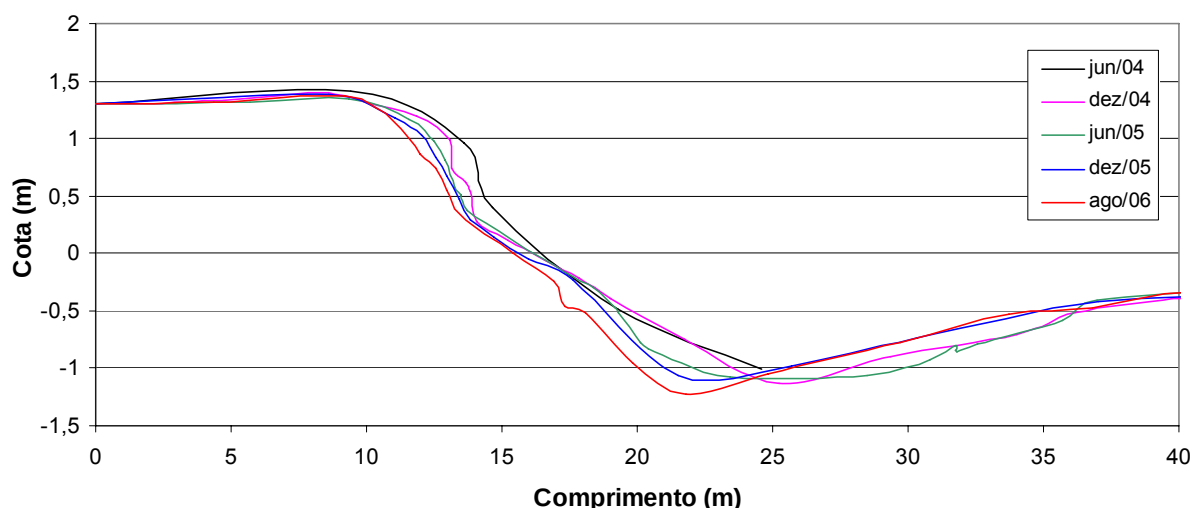


Figura 8.5. Perfis topográficos P8 monitorados no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).

O perfil P9 está localizado na margem direita do canal de maré denominado de rio Volta do Sertão (Figuras 8.1), mais especificamente na margem côncava de um meandro, onde se inicia sobre a superfície plana de uma planície de maré e se prolonga por mais 25 metros até atingir o referido canal (Figura 8.2). A transição da planície para o canal ocorre na forma de uma escarpa de erosão com aproximadamente 0,50 m de altura. A partir desta escarpa, os processos erosivos são bastante significativos, como pode ser observado na figura 6, na qual observa-se claramente uma migração da linha delimitadora da escarpa para SE, ou seja, na direção da planície de maré (Figura 8.6).

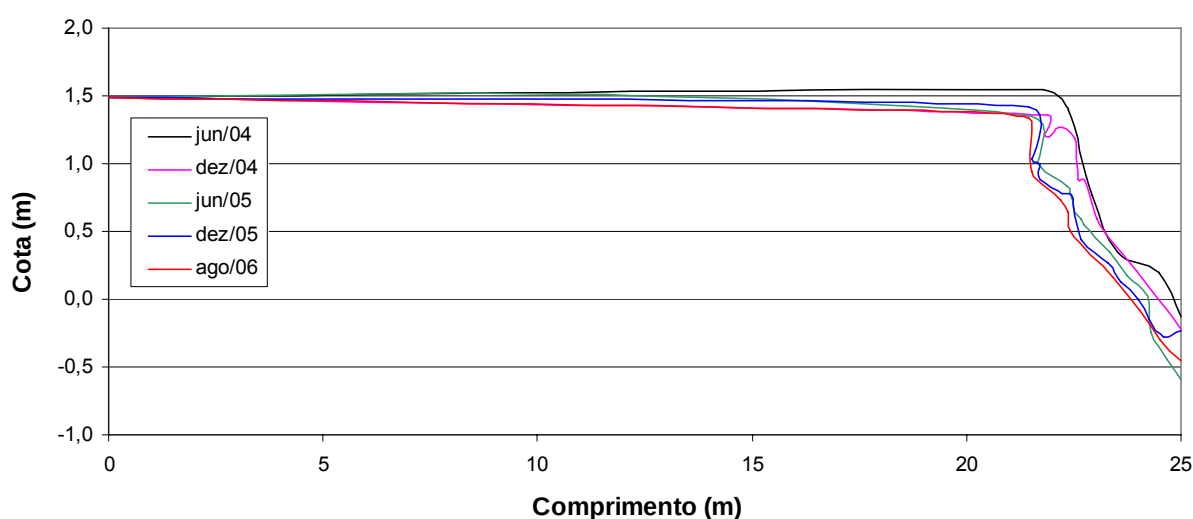


Figura 8.6. Perfis topográficos P9 monitorados no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).

O perfil P10 está localizado na margem esquerda de um meandro (margem côncava) no rio Volta do Sertão, com 30 metros de extensão (Figura 8.1). Inicia-se sobre os sedimentos arenosos de um terraço flúvio-estuarino e projeta-se para SE na direção do centro do canal (Figuras 8.2). O limite entre o canal e o terraço é definido por uma escarpa de erosão com altura média de 1,2 metro, a qual define a posição da preamar. No topo do terraço, não ocorreram variações morfológicas representativas, entretanto observou-se que a posição da escarpa migrou de junho/04 a agosto/06 para NW (direção do terraço), evidenciando um processo de erosão do terraço arenoso flúvio-estuarino. Da base da escarpa até aproximadamente 8,2 metros, não ocorreram variações morfológicas no perfil, sendo uma faixa caracterizada geomorfologicamente por uma pequena praia arenosa com aproximadamente 250 m de comprimento. A partir deste ponto, inicia-se a calha do rio, onde ocorreu importante deposição de sedimentos no período estudado (Figura 8.7).

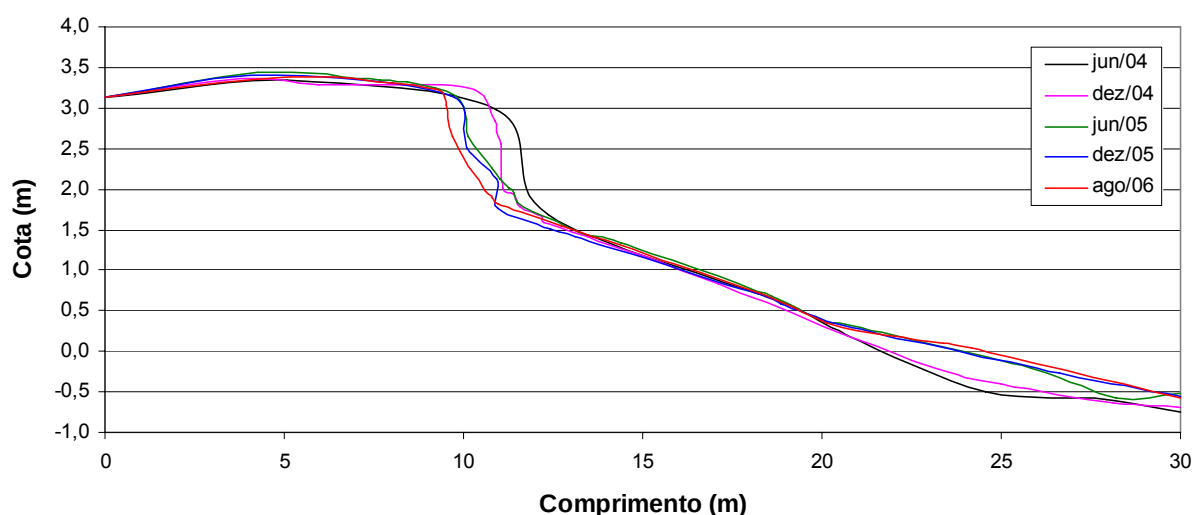


Figura 8.7. Perfis topográficos P10 monitorados no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).

O perfil P11 está localizado na margem esquerda do rio Pisa Sal na direção à montante, sobre uma superfície plana de planície de maré (Figuras 8.1), seguindo para SE em direção ao canal do rio Pisa Sal em uma extensão de 21 metros que termina em uma praia arenosa na margem do canal. A configuração deste perfil apresenta escarpa pouco desenvolvida com altura média de 0,25 m, que também serve de linha delimitadora das preamares (Figura 8.2). O processo erosivo, neste perfil, não é significativo: observa-se um rebaixamento gradual da superfície original ao longo dos

27 meses de monitoramento, com migração da linha de escarpa em direção à planície (NW). A partir da linha média das marés, observa-se que, em direção do centro do canal, ocorreu pequena deposição de sedimentos, principalmente entre junho/05 e agosto/06 (Figura 8.8).

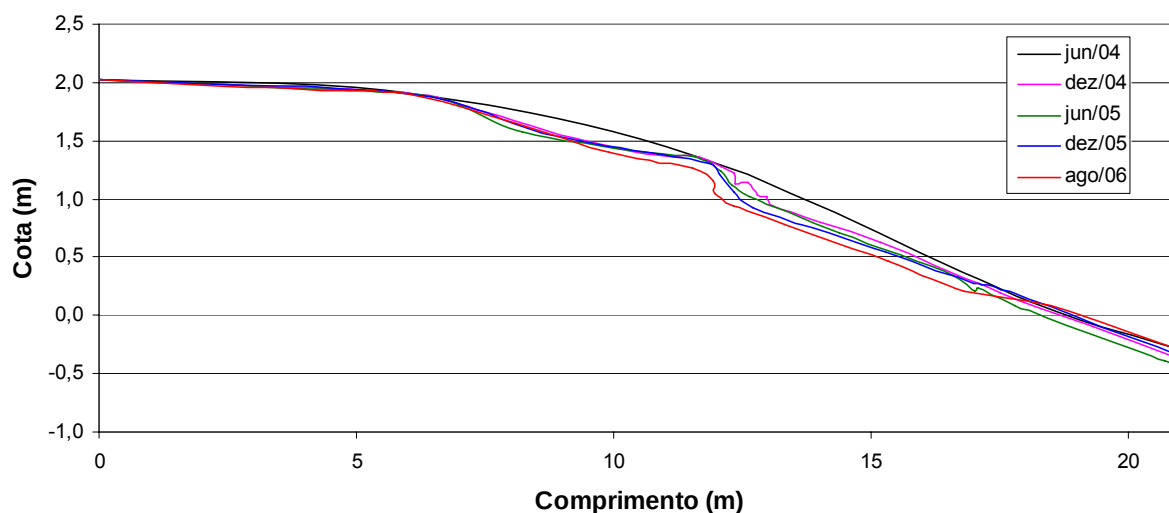


Figura 8.8. Perfis topográficos P11 monitorados no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).

O perfil P12 localiza-se na margem direita do rio Pisa Sal sobre o talude do viveiro 3, à montante da estação de bombeamento da Camarus e à jusante do canal de despesca (CD 1) (Figura 8.1). A partir deste ponto, segue para SW em direção ao centro do rio Pisa Sal, atingindo uma extensão de 40 m (Figura 8.2). Fenômenos de erosão e deposição ocorreram no topo e na vertente do talude, principalmente durante o período das chuvas. Entre a base do talude até à distância de 35 metros, o perfil praticamente manteve-se em equilíbrio morfológico. Entretanto, a partir dos 35 metros, já adentrando à calha do rio Pisa Sal, ocorreu erosão sistemática ao longo do período monitorado (Figura 8.9).

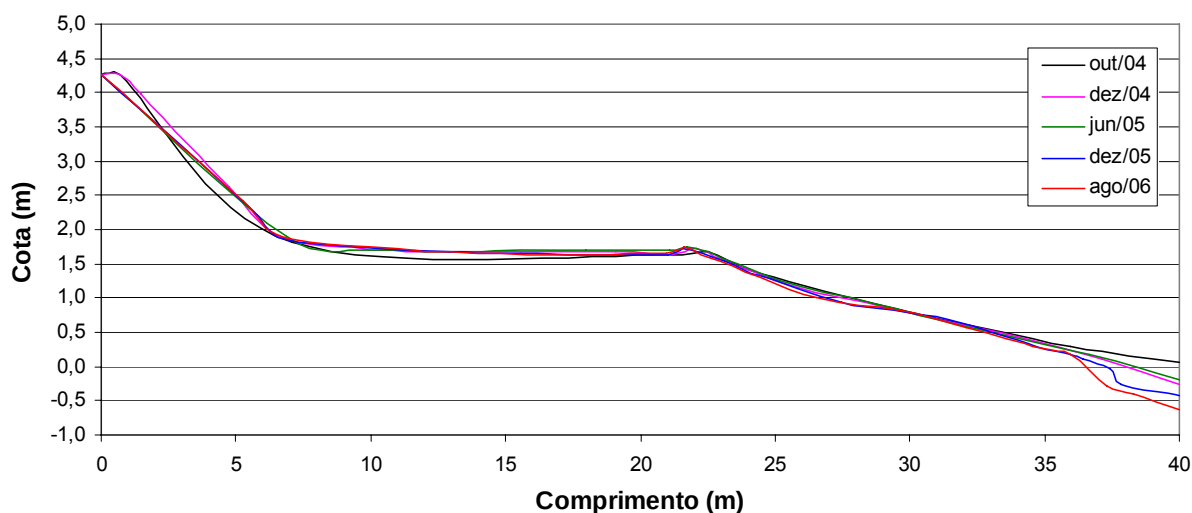


Figura 8.9. Perfis topográficos P12 monitorados no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).

8.2.2 Canais de Despesca (CDs)

O perfil P1 inicia no topo do talude do viveiro e segue 42 m na direção NE, cruzando o CD 2 e termina sobre a superfície plana de uma planície de maré (Figura 8.1 e 8.2). O monitoramento mostrou erosão na sua margem esquerda, principalmente na base do talude, enquanto, na margem direita, predominou a deposição, bem como no centro do CD. Na superfície da planície de maré, ocorreu equilíbrio destes processos, permanecendo sem alteração morfológica (Figura 8.10).

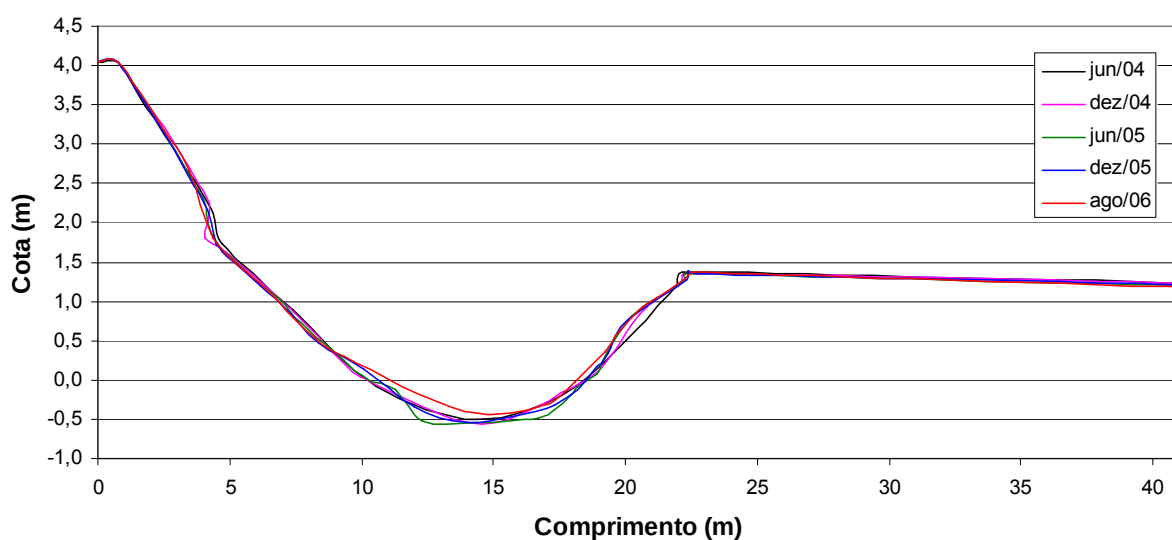


Figura 8.10. Perfis topográficos P1 monitorados no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).

O perfil P 2 apresenta 30 m extensão, iniciando no topo do talude do viveiro e segue na direção SW, atravessa o CD 2 e termina na planície de maré (Figuras 8.1 e 8.2). Este perfil apresenta erosão nas duas margens: na margem esquerda, a erosão é insignificante e ocorre no sopé do talude, enquanto, na margem direita, observa-se uma pequena escarpa de erosão com altura média de 0,30 metros, que migra em direção ao interior da planície. No centro do CD, é evidente a deposição de sedimentos ao longo dos 27 meses monitorados (Figura 8.11).

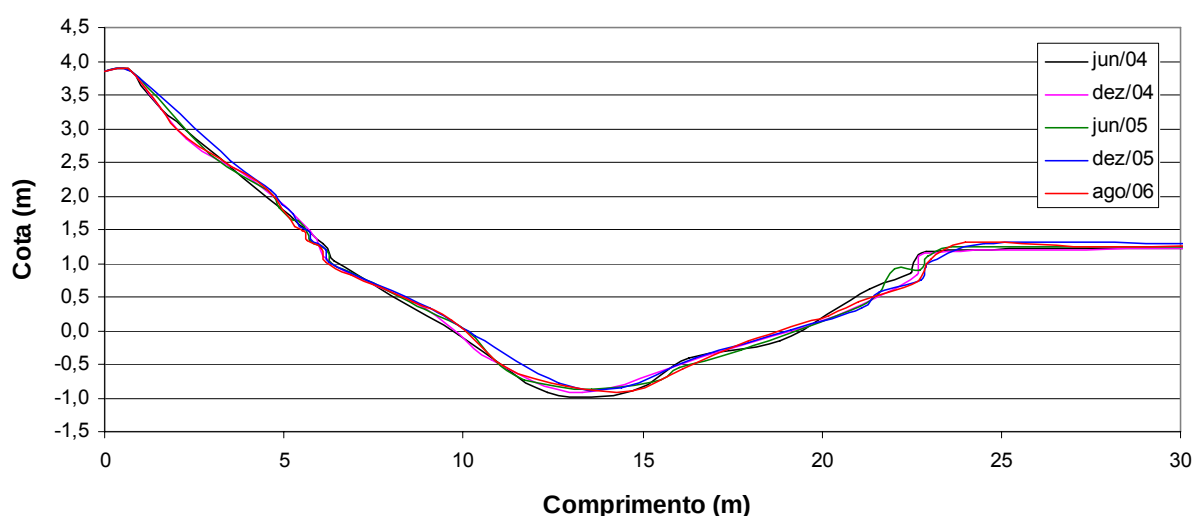


Figura 8.11. Perfis topográficos P2 monitorados no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).

O perfil P 3 está orientado para SW na direção do rio Pisa Sal, cruza o CD 1 e atinge uma extensão de 33 m na zona de intermaré (Figura 8.1 e 8.2). Este perfil apresenta intenso processo de erosão na sua margem direita, onde atinge totalmente o talude do viveiro, inclusive com formação de ravinas. A figura 8.12 mostra claramente o recuo da linha de talude ao longo do período monitorado. A partir da distância de 5 metros do início do perfil, ocorre uma faixa de aproximadamente 6,6 metros onde predomina a deposição de sedimentos oriundos da erosão do talude. Na margem esquerda, ocorre uma pequena escarpa erosional, enquanto, na superfície da zona de intermaré, observa-se deposição insignificante. No centro do CD, observa-se uma morfologia regular e constante ao longo do monitoramento (Figura 8.12).

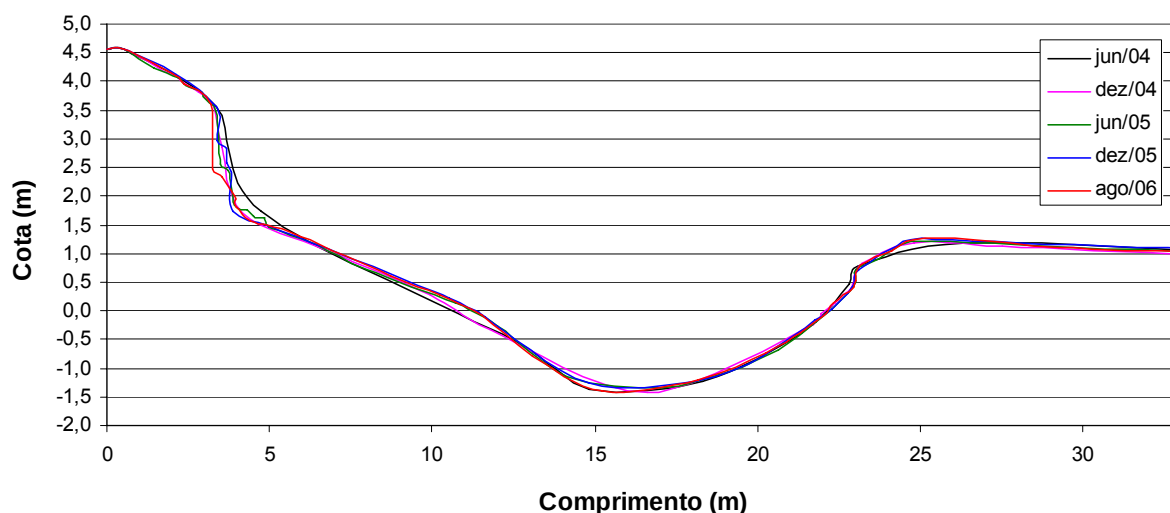


Figura 8.12. Perfis topográficos P3 monitorados no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).

O perfil P 4 apresenta extensão de 44 metros na direção SW, inicia-se sobre o talude dos viveiros, cruza o CD 1 e atinge a planície de intermaré até o limite com o mangue (Figuras 8.1 e 8.2). Na margem esquerda, ocorre erosão na base do talude do viveiro até à distância de aproximadamente 8 metros. A partir deste ponto, em direção ao centro do canal, ocorre deposição dos sedimentos provenientes do talude. No centro do canal, ocorrem variações nos processos de erosão e deposição, entretanto a configuração do canal apresenta-se uniforme. Na margem esquerda deste perfil, ocorre o mais importante processo de erosão da planície de intermaré, margeando os CDs. Esta margem apresenta um forte gradiente (1:1,6), onde ocorre a presença de 5 escarpas escalonadas e linhas de gretas de contração paralelas ao canal. A figura 8.13 mostra claramente a migração destas escarpas em direção ao rio Pisa Sal. Na planície de intermaré observa-se um equilíbrio morfológico.

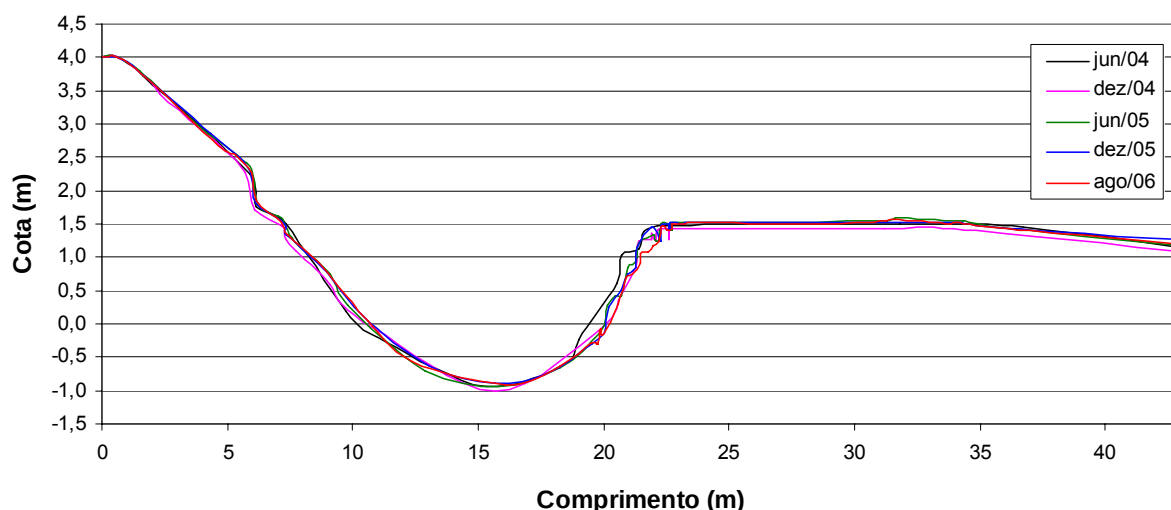


Figura 8.13. Perfis topográficos P4 monitorados no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).

O perfil P 5 apresenta 25 metros de extensão, segue na direção S, atravessa o CD 1 e atinge o mangue (Figura 8.1 e 8.2). Observa-se, na sua margem direita, a erosão do talude do viveiro cujos sedimentos são carreados para o interior do CD. Neste perfil, foram instaladas, na margem direita e no centro do CD, obras para contenção do processo erosivo, utilizando troncos de carnaúba, os quais estão posicionadas a 5 e 12,5 metros do início do perfil, onde se observa a ocorrência de deposição de sedimentos. Na margem esquerda, observa-se erosão que provoca a formação de uma escarpa com altura média de 0,30 metros. Na planície de intermaré, observa-se um insignificante processo erosivo (Figura 8.14).

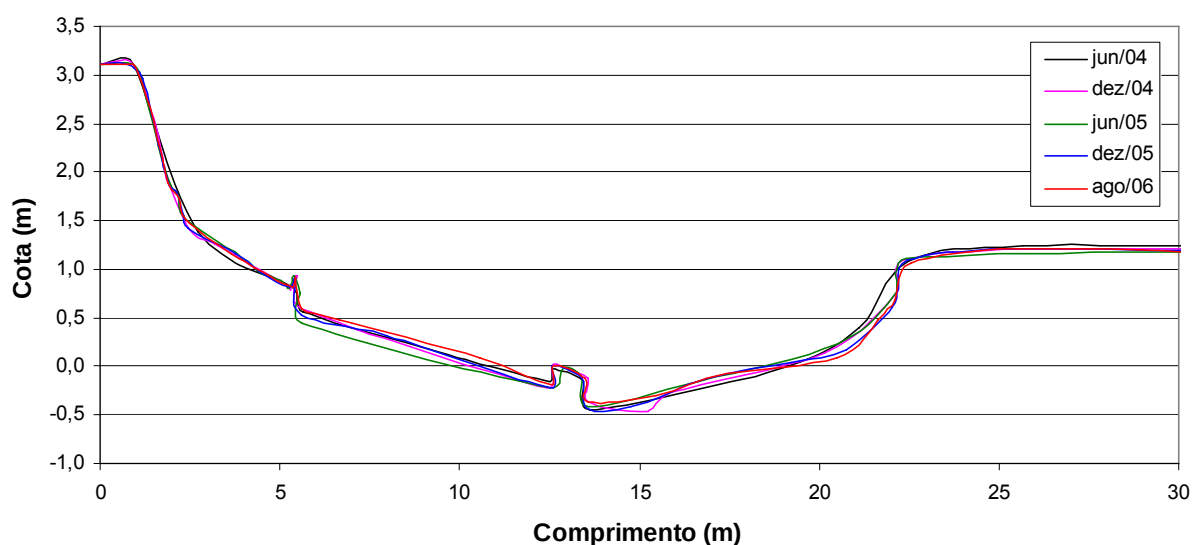


Figura 8.14 Perfis topográficos P5 monitorados no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).

O perfil P 6 inicia-se no topo do talude do viveiro e segue na direção SW até atingir o mangue numa distância de 37 metros (Figura 8.1 e 8.2). Neste perfil, também foram instaladas, na margem direita, obras para contenção da erosão com troncos de carnaúba a uma distância de 6,8 metros do seu início. Neste perfil, predomina a deposição, seja na sua margem direita, esquerda ou no centro do CD, entretanto, uma erosão insignificante ocorre na margem direita (talude) e na margem esquerda do CD entre o período de junho/04 e junho/05 (Figura 8.15). Corroborando com esta informação, observa-se que, entre junho/04 e dezembro/04, o talvegue migra 2,0 metros em direção a sua margem esquerda (SW).

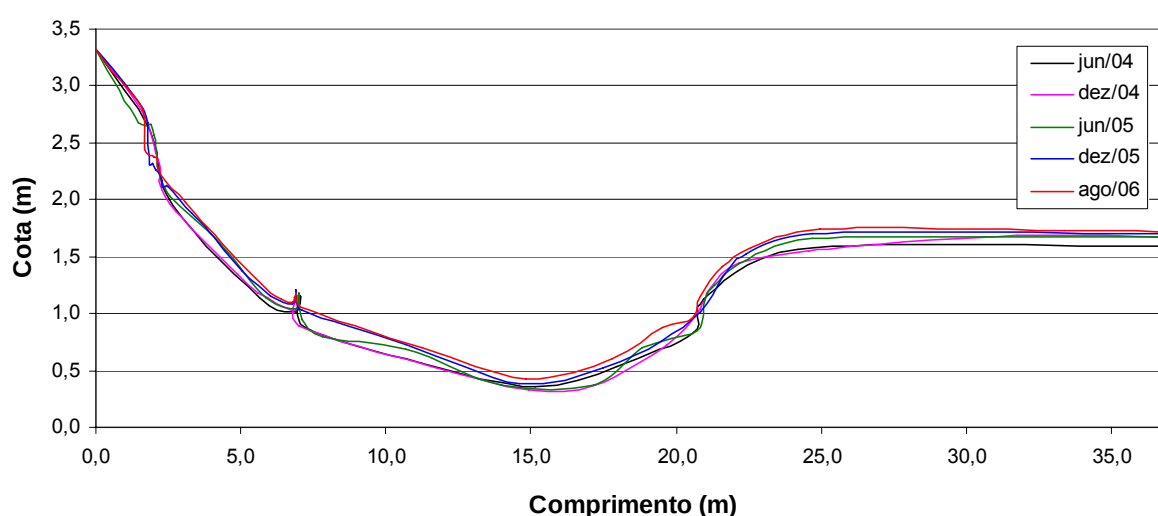


Figura 8.15. Perfis topográficos P6 monitorados no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).

O perfil P13 localiza-se na margem direita do rio Pisa Sal sobre o talude do viveiro 3, à montante da estação de bombeamento da Camarus e à jusante do canal de despesca (CD 1) (Figura 8.1 e 8.2). No talude do viveiro (margem direita), ocorreram alternadas fases de erosão e deposição. Entre outubro/04 e junho/05, observou-se acúmulo de sedimentos na face do talude que se propaga até o início do CD, que sofreu, a partir de junho/05, erosão deste material. No flanco direito do CD, o processo de erosão foi acentuado, o qual ocorreu na forma de sucessivas linhas de escarpas escalonadas que migraram em direção ao talude desde outubro/04 até hoje. Este flanco apresenta um gradiente na ordem de 1:2. O talvegue migrou no período de outubro/04 a dezembro/05 em direção à margem direita (NW) 5,8 metros, com isso erodindo fortemente esta margem e aumentando a profundidade do canal (Figura

8.16). Na margem esquerda, predomina a deposição associada com pequenos eventos erosivos, o que favoreceu o aparecimento de um pequeno banco lamoso.

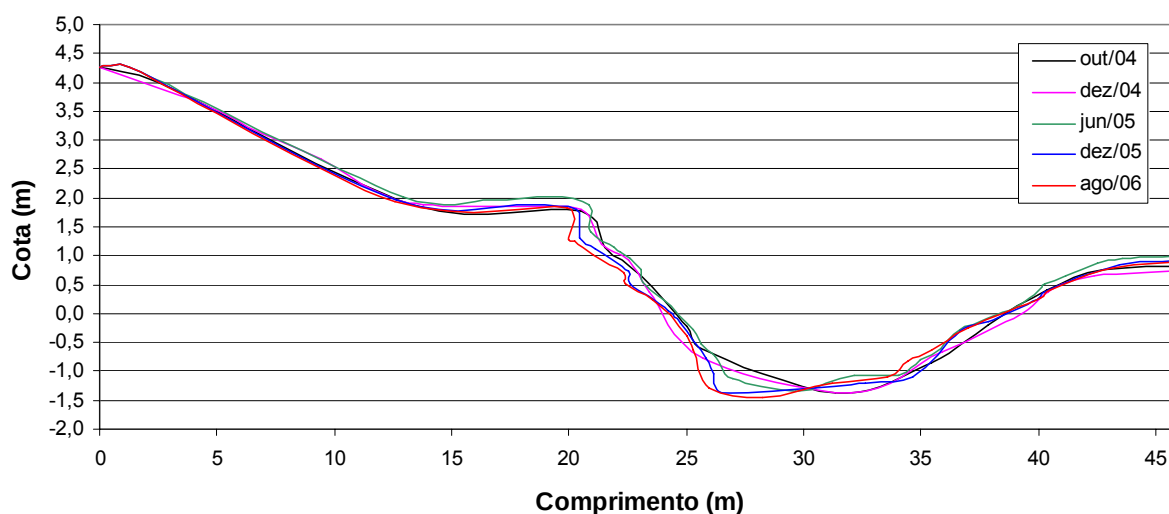


Figura 8.16. Perfis topográficos P13 monitorados no período de junho de 2004 a agosto de 2006 (27 meses).

8.3 ANÁLISE QUANTITATIVA DA EROSÃO

8.3.1 Sistema Pisa Sal

A análise dos dados do monitoramento topográfico nos canais de marés (P7 ao P12) permitiu quantificar o volume de sedimento erodido e/ou depositado ao longo de cada perfil (Figura 17), bem como estimar a quantidade de sedimentos que é transportada pelos canais, que podem alcançar a desembocadura do complexo estuarino lagunar de Galinhos-Guamaré e contribuir para a formação dos deltas de marés de vazante ou ficar aprisionado em armadilhas, como meandros, ao longo dos canais.

Numa análise geral, pode-se destacar que a maioria dos perfis estudados apresenta dominância da erosão sobre a deposição (P7, P8, P9 e P12), ocorre dominância da deposição sobre a erosão no perfil P10 e um estado de equilíbrio entre a erosão e deposição no perfil P 11 (Figura 8.17).

Nos 27 meses de monitoramento, foram erodidos $101,62 \text{ m}^3/\text{m}$ e depositados $90,07 \text{ m}^3/\text{m}$ de sedimentos nos 7 perfis (Figura 8.17), o que confere um excedente de erosão na ordem de $11,55 \text{ m}^3/\text{m}$. Com base nestes valores, chega-se a uma erosão anual nestes locais de $45,12 \text{ m}^3/\text{m}$.

Considerando o comprimento dos trechos nas margens dos canais onde foram locados os perfis, pode-se estimar o volume total médio de sedimentos disponibilizados para os canais pela erosão na ordem de 9.775,88 m³/ano (Tabela 8.1). O comprimento total do trecho onde ocorre erosão, foi definido em observações de campo e dimensionado a partir de imagem de satélite Ikonos (2003).

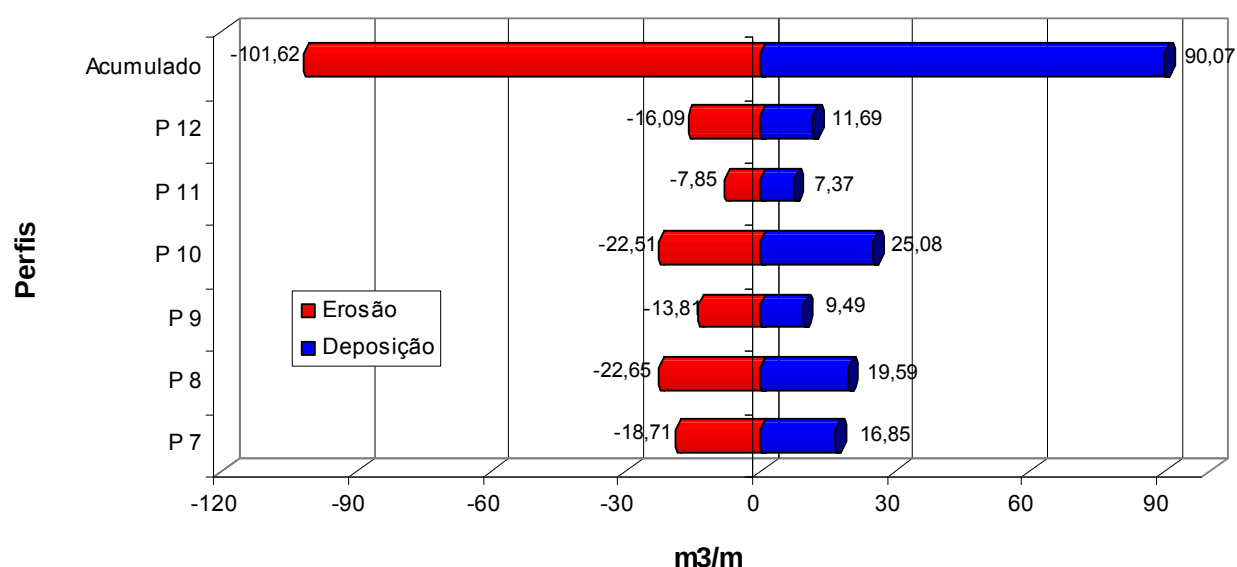


Figura 8.17. Volume total de material erodido e depositado (m³/m) nos 6 perfis monitorados no sistema Pisa Sal no período de junho de 2004 a agosto de 2006. Os valores negativos representam erosão, enquanto os valores positivos, deposição.

Tabela 8.1. Volume médio e volume total médio de material erodido nos trechos onde estão localizados os perfis topográficos.

Perfis	Volume total (m ³ /m)	Média mensal (m ³ /m)	Média anual (m ³ /m)	Comprimento do trecho (m)	Vol. médio do trecho (m ³ /ano)
P 7	18,71	0,69	8,32	270	2.245,20
P 8	22,65	0,84	10,07	150	1.510,00
P 9	13,81	0,51	6,14	500	3.068,89
P 10	22,51	0,83	10,00	250	2.501,11
P 11	7,85	0,29	3,49	60	209,33
P 12*	16,09	0,67	8,05	30	241,35
Total	101,62	0,64	7,68	1.260	9.775,88

* Início do monitoramento em setembro de 2004.

Os dados dos perfis topográficos também permitem estabelecer uma taxa de erosão das escarpas. Estabelecendo a relação espaço-temporal das escarpas ao

marco zero de cada um dos perfis, pode-se acompanhar o deslocamento da linha de escarpa devido à erosão atuante. A tabela 8.2 mostra este deslocamento em 3 datas distintas e as suas respectivas distâncias erodidas, permitindo calcular a taxa de erosão média anual, a qual varia entre 0,09 e 0,72 m/ano.

Tabela 8.2. Distâncias das escarpas das margens dos rios ao marco zero de cada perfil e taxa de erosão média anual das escarpas.

Perfis	jun/04 (m)	jun/05 (m)	ago/06 (m)	jun/04 a ago/06 (m)	Taxa média (m)
P7	14,874	14,467	14,336	0,538	0,24
P8	9,402	9,338	9,196	0,206	0,09
P9	21,775	21,514	21,442	0,333	0,15
P10	10,928	9,766	9,317	1,611	0,72
P11	11,805	11,581	11,531	0,274	0,12
P12*	22,475	22,028	21,619	0,856	0,43

* Início do monitoramento em setembro de 2004.

8.3.2 Canais de Despesca (CDs)

Os resultados do monitoramento topográfico dos perfis (P1 a P6 e P13) nos canais de despesca (CD1 e CD2) mostram que o volume total de sedimento erodido e depositado no período estudado está em equilíbrio, na ordem de 87,82 m³/m e 87,52 m³/m, respectivamente. O volume erodido é transportado em direção ao rio Pisa Sal e irá formar bancos arenosos na foz dos CDs. Nos perfis P1, P3, P4 e P13, ocorre predomínio da erosão sobre a deposição, enquanto o inverso pode ser observado nos perfis P2, P5 e P6 (Figura 8.18). O volume médio anual de material erodido no CD1 e no CD2 é de 60,41 e 27,41 m³/m, respectivamente.

Levantados os comprimentos dos trechos nas margens dos CDs onde estão posicionados os perfis, estimou-se o volume total médio de sedimentos disponibilizados para os CDs pela erosão na ordem de 2.155,20 m³/ano (Tabela 8.3). O comprimento total dos trechos onde ocorre erosão foi definido em observações de campo e calculado a partir de imagem de satélite Ikonos (2003).

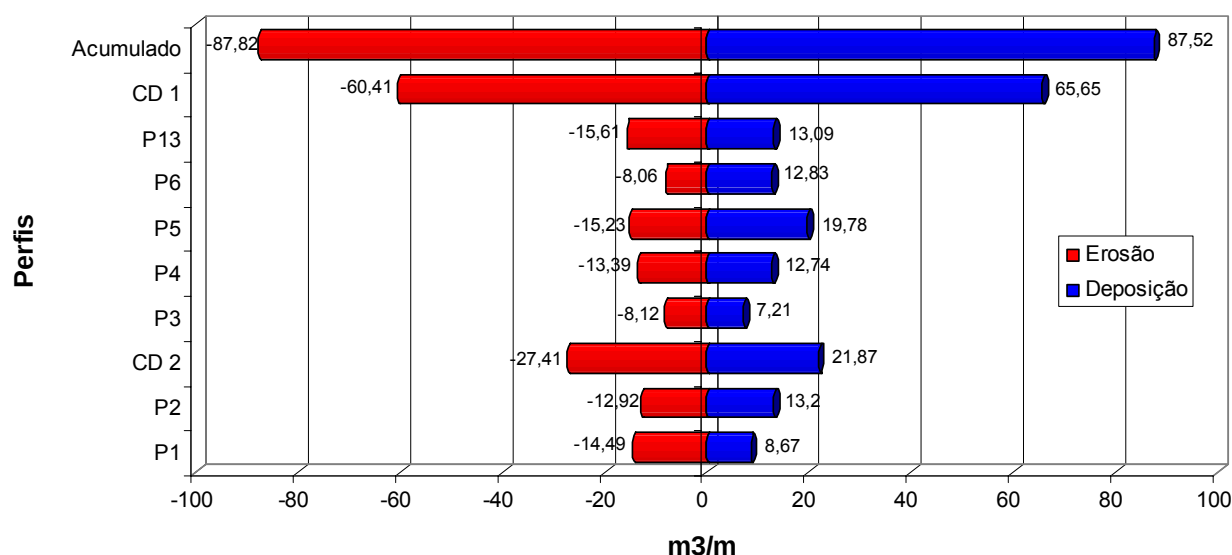


Figura 8.18. Volume total de material erodido e depositado (m^3/m) nos 7 perfis monitorados nos canais de despeço (CD 1 e CD 2) no período de junho de 2004 a agosto de 2006. Os valores negativos representam erosão, enquanto os positivos, deposição.

Tabela 8.3. Volume médio anual de erosão nos perfis e CDs e volume total médio considerando todo comprimento dos trechos erodidos nos perfis topográficos.

Perfis	Volume total (m^3/m)	Média mensal (m^3/m)	Média anual (m^3/m)	Comprimento do trecho (m)	Volume médio do trecho (m^3/ano)
P 1	14,49	0,54	6,48	45	291,60
P 2	12,92	0,48	5,76	75	432,00
CD 2					723,60
P 3	8,12	0,30	3,60	85	306,00
P 4	13,39	0,50	6,00	75	450,00
P 5	15,23	0,56	6,72	40	268,80
P 6	8,06	0,30	3,60	45	162,00
P 13*	15,61	0,68	8,16	30	244,80
CD 1					1.431,60
Total				395	2.155,20

* Início do monitoramento em outubro de 2004.

A dragagem das planícies de intermaré e supramaré para construção dos CDs conferiu aos seus flancos uma morfologia escarpada, em alguns casos com inclinação vertical a sub-vertical. O monitoramento da migração destas escarpas (margem direita e esquerda) fornece importantes informações sobre a evolução morfológica dos CDs e sobre as características da erosão.

A taxa de erosão média das escarpas dos CDs é aproximadamente igual. Para o CD1, é da ordem de 0,27 m e, para o CD 2, é de 0,33 m (Tabela 8.4). As diferentes taxas encontradas nos perfis devem-se às características de cada um, principalmente relacionadas ao ângulo de sinuosidade dos meandros, à velocidade das correntes de marés e ao gradiente topográfico.

Tabela 8.4. Distâncias das escarpas das margens dos CDs ao marco zero de cada perfil e taxa de erosão média anual das escarpas.

Perfil	Margem	jun/04 (m)	jun/05 (m)	jul/06 (m)	jun/04-jul/06 (m)	Taxa media anual (m)	
P1	Direita	22,163	22,276	22,504	-0,341	-0,16	0,27
	Esquerda	4,252	3,983	3,435	0,817	0,38	
P2	Direita	22,891	23,626	24,006	-1,115	-0,51	0,38
	Esquerda	6,100	5,661	5,561	0,539	0,25	
Média anual do CD 2							0,33
P3	Direita	3,937	3,738	3,241	0,696	0,32	0,40
	Esquerda	23,086	23,729	24,133	-1,047	-0,48	
P4	Direita	5,905	5,757	5,363	0,542	0,25	0,19
	Esquerda	22,187	22,293	22,457	-0,270	-0,12	
P5	Direita	2,727	2,366	1,895	0,832	0,38	0,22
	Esquerda	22,437	22,439	22,542	-0,105	-0,05	
P6	Direita	2,668	2,539	2,226	0,442	0,20	0,28
	Esquerda	24,200	24,690	24,950	-0,750	-0,35	
P13*	Direita	20,491	20,270	19,896	0,595	0,32	0,28
	Esquerda	42,766	43,090	43,190	-0,424	-0,23	
Média anual do CD 1							0,27

* Início do monitoramento em outubro de 2004.

OBS 1: O sinal negativo significa que a escarpa está se distanciando do marco zero do perfil, ou seja, a sua distância em relação ao marco zero no início do monitoramento (junho/04) é menor que a distância no final do monitoramento (agosto/06). Por sua vez, o sinal positivo significa que a escarpa está se aproximando do marco zero do perfil, ou seja, a sua distância em relação ao marco zero no início do monitoramento (junho/04) é maior que a distância no final do monitoramento (agosto/06). Para a taxa média anual de cada perfil e dos CDs foi aplicada a relação modular.

Em alguns trechos, a escarpa da margem esquerda do CD 1 chega próximo à franja de mangue e a margem direita do rio Pisa Sal, como, por exemplo, na área do perfil P 4 onde as menores distâncias são: 18,0 m e 32,0 m, para a franja de mangue e margem direita do canal Pisa Sal, respectivamente (Figura 8.19). Considerando as mesmas condições ambientais atuais, onde a taxa de erosão média para a margem esquerda (margem voltada para o mangue) do P4 é de 0,19 m/ano, a erosão atingirá,

respectivamente, o mangue e a margem esquerda do canal Pisa Sal em aproximadamente 95 e 168 anos.

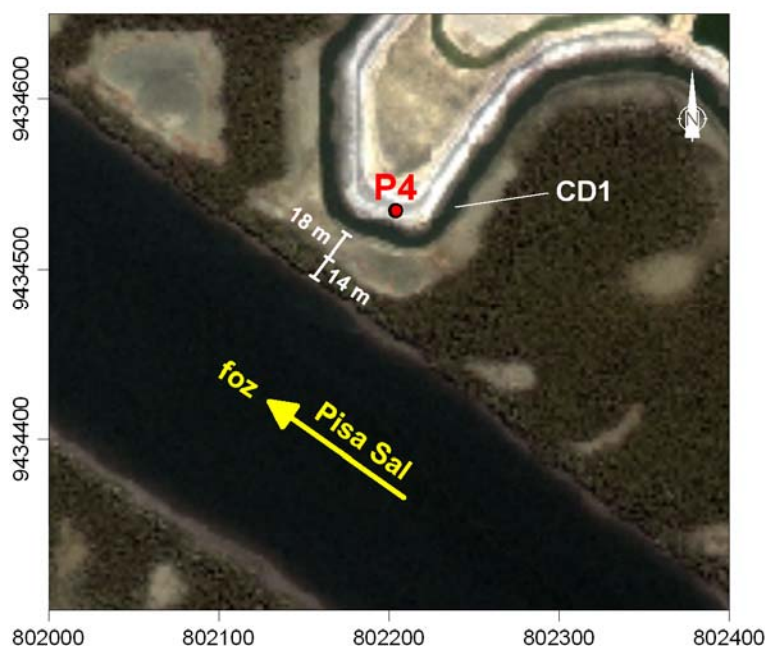


Figura 8.19. Imagem Ikonos (2003), mostrando a localização do P4, do CD1, a distância do CD para a franja de mangue e para o canal Pisa Sal.

8.4 AGENTES E FEIÇÕES EROSIVAS

A erosão no sistema Pisa Sal, que pode ser extensiva ao complexo estuarino lagunar Galinhos-Guamaré, é causada por fenômenos oceanográficos, climáticos e antrópicos, dentre os quais destacam-se: as marés, as correntes de marés, a chuva, o escoamento superficial, o vento, as ondulações, a escavação de canais, a infiltração, a composição e a manutenção de taludes. Como consequência da ação desses agentes dinâmicos, ocorrem movimentos de massa de pequena escala do tipo escorregamento e queda de bloco, segundo Selby (1982), IPT (1989) e Augusto Filho (1994).

As marés de enchente de sizígia atingem as planícies de supramaré areno lamosas que bordejam os CDs. Durante a baixa-mar, estes sedimentos ficam expostos ao sol e são formadas gretas de contração, fendas longitudinais e transversais às margens escarpadas dos CDs. Estas feições evoluem com a co-oscilação da maré e são intensificadas durante o período das chuvas. As fendas longitudinais ocorrem em várias linhas paralelas (Figura 8.20A) e, durante as preamares, são lubrificadas pela percolação da água e formam planos de deslizamentos escalonados (Figura 8.20B e

C). As figuras 8.20D e 8.20E mostram deslizamentos na margem esquerda do CD1 e a figura 8.20F mostra queda de blocos.



Figura 8.20. Deslizamentos, queda de blocos e feições erosivas na margem esquerda do CD1 em frente aos perfis P3 e P4: Fendas longitudinais paralelas ao canal (A), feições erosivas escalonadas (B) e (C), escorregamento no P3 (D) e P4 (E), e queda de bloco no P3 (F). As planícies de supramarés (C, D e E) são completamente inundadas durante as marés de sizígia de enchente.

A eficiência das correntes de marés, principalmente as de vazante, como descrita no Capítulo 7 - Correntes e Propriedades Termohalinas do Sistema Pisa Sal, erodem as margens côncavas dos canais (naturais ou escavados) a partir da sua base, gerando escarpas verticais, as quais migram em direção à terra firme.

O curto período de inverno, concentrado nos meses de março a junho, gera um pequeno volume de chuva, com precipitação média de 683 mm, segundo a estação meteorológica da EMPARN localizada no município de Guamaré-RN. Estas chuvas ocorrem aleatoriamente e são concentradas em pequenos espaços de tempo. Ao atingirem os solos da área, infiltram-se nas áreas arenosas de dunas, escoam superficialmente nos sedimentos areno-argilosos das planícies de supramaré e escoam e infiltram-se nas areias argilosas com conchas dos taludes dos viveiros. O escoamento superficial ocorre na forma de fluxos lineares (erosão linear), formando microravinas, que evoluem para ravinas, principalmente nos taludes dos viveiros que bordejam os CDs (Figura 8.21). Fluxos sub-superficiais e infiltrações dos viveiros afloram na base dos taludes e incrementam o processo erosivo e o transporte de sedimentos finos (Figura 8.21B). Segundo Guerra *et al.* (1999), o escoamento

superficial e o fluxo vertical atuam conjuntamente na formação de ravinas e voçorocas, as quais são definidas, segundo o caráter dimensional, como incisões $\leq 0,5$ m e $> 0,5$ m de largura e profundidade, respectivamente (Guerra, 1998). Outras feições erosivas também são identificadas: pedestais (“chaminé-de-fada”), alcovas de regressão e cones de areia (Guerra *et al.*, 1999).

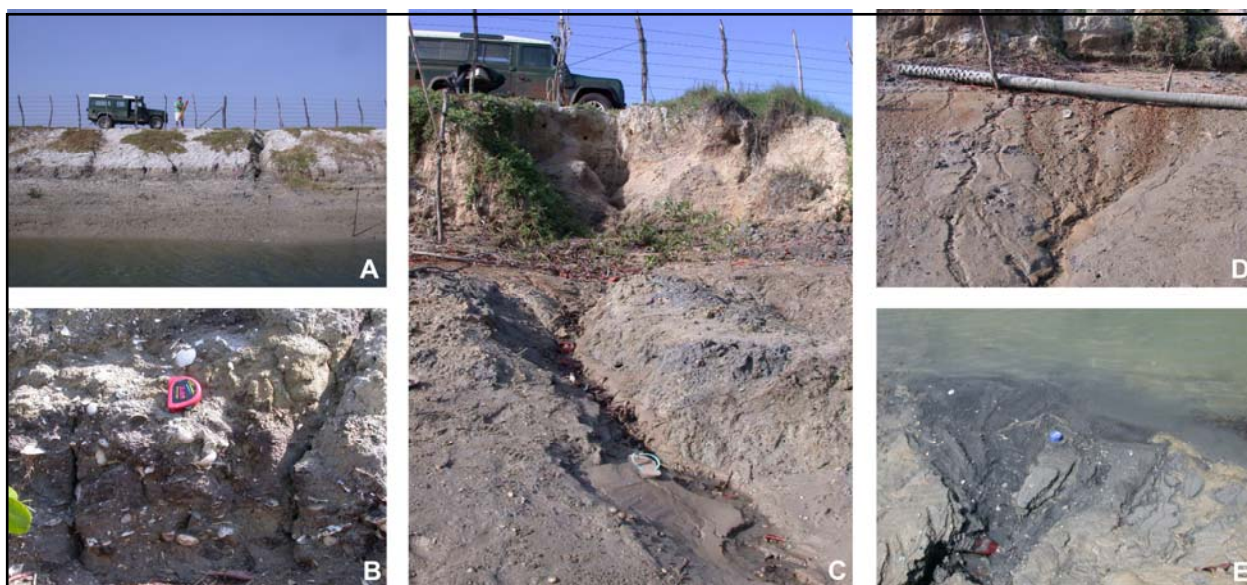


Figura 8.21. Feições erosivas no talude dos viveiros em frente ao P3: micro-ravinas e ravinas (A), detalhe de micro-ravina (B), detalhe da ravina (C), infiltração do viveiro para o CD na base do talude (D) e detalhe do conduto de escoamento da infiltração na forma de “delta” na margem do CD e pluma de sedimentos lamosos em suspensão (E).

A ação dos ventos SE e E na superfície da água dos canal de marés, CDs e viveiros gera ondulações de pequeno comprimento de onda e alta frequência que, ao atingirem as suas margens, causam forte erosão. A ausência de vegetação em trechos dos taludes e de trabalhos de manutenção incrementa a ocorrência dos processos erosivos.

8.5 DISCUSSÕES

A metodologia de monitoramento topográfico, utilizando Medidor Eletrônico de Distância tipo Estação Total em zonas de canais de marés, canais dragados e até estuários não é comum na bibliografia especializada, entretanto os resultados deste estudo mostram que constitui-se em uma excelente ferramenta para quantificar o volume de material erodido e registrar as variações morfológicas que ocorrem nos

canais. Atualmente também se utiliza o Sistema de Posicionamento Global (GPS) com precisão geodésica em estudos sobre a evolução morfológica de ambientes praias (Saraiva, 2008).

Zonas erosivas nos canais do sistema Pisa Sal ocorrem sempre associadas a margem côncava das curvas e a meandros de elevada sinuosidade do canal, as quais estão identificadas na figura 8.22.

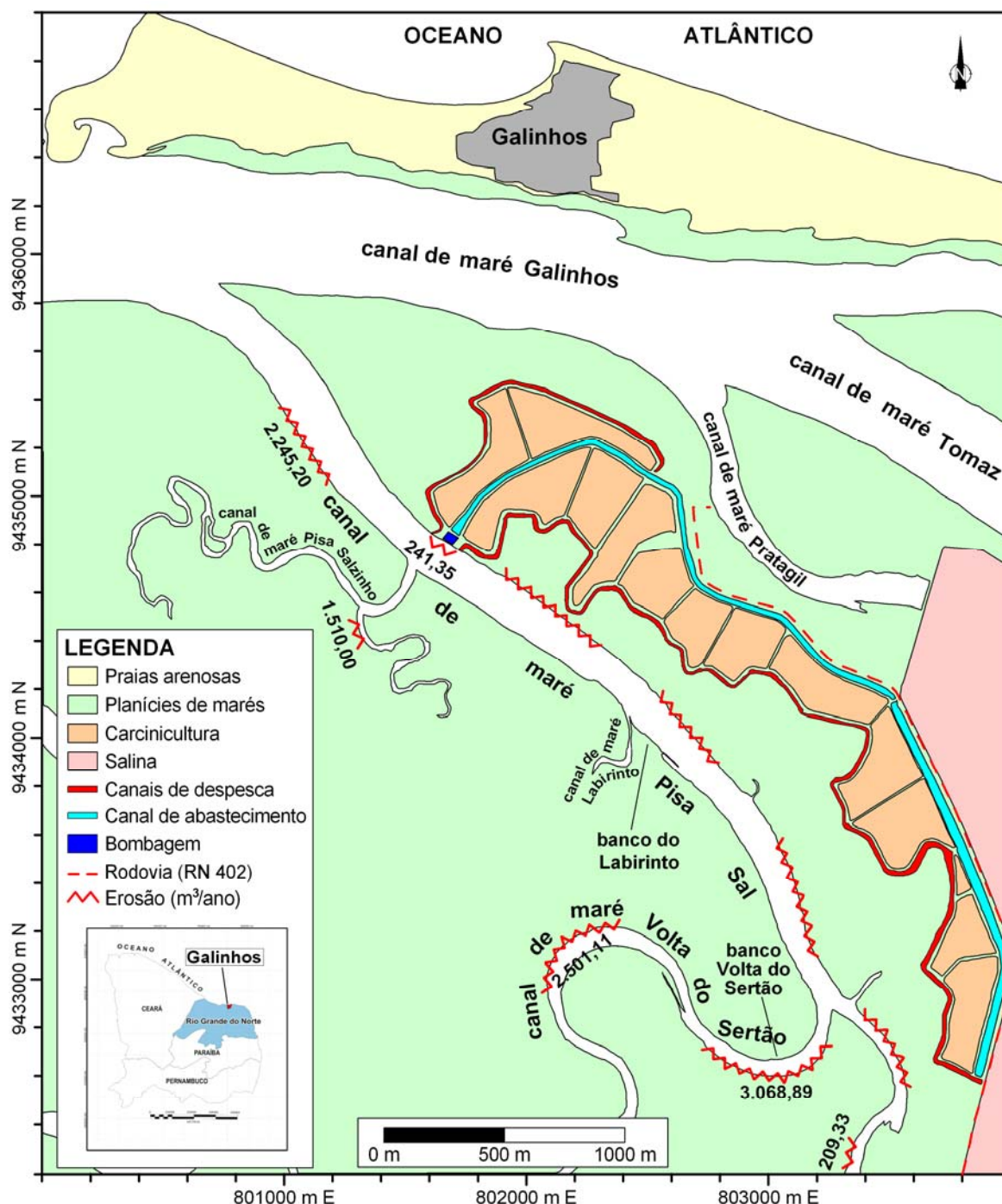


Figura 8.22. Mapa de localização das zonas de erosão com volume de material erodido (m^3/ano) e zonas de sedimentação de bancos arenosos e lamosos. (intermarés).

As variações morfológicas nos perfis P7, P9 e P10 mostram migração da margem do canal em direção ao continente, resultando em um importante volume erodido. Esses três perfis estão localizados em zonas curvas do canal, com o P9 e P10 no lado côncavo dos meandros do canal Volta do Sertão, por isso apresentando maiores volumes erodidos. O P7 está localizado numa zona de sinuosidade baixa, entretanto, próxima à desembocadura do sistema e exposto às altas velocidades das correntes e à ação das ondulações geradas pelo vento, que intensificam o processo erosivo evidenciado pelo grande volume (Figura 8.22). O P13 localizado na margem convexa do canal, em frente à estação de bombeamento da Camarus, mostra pequeno volume erodido, devido à proximidade da desembocadura do CD1 e do bombeamento.

O volume erodido de $9.775,88 \text{ m}^3/\text{ano}$ nos 1.260 m (Tabela 8.1) que correspondem aos trechos erodidos sob influência dos perfis monitorados representa um volume inferior ao potencial de susceptibilidade à erosão do sistema Pisa Sal, considerando que a extensão aproximada do canal Pisa Sal (8,0 km) e Volta do Sertão (3,4 km) é de 11,4 km e que, durante o período monitorado (2004-2006), a média de chuva na área foi de 248,7 mm (Tabela 4.9).

A construção dos CDs e viveiros acompanhando a franja de mangue, estabeleceu uma configuração irregular para ambos, fato que permitiu a preservação de todo esse bioma na área da fazenda da Camarus, entretanto trechos dos canais escavados mostram fortes ângulos (Figura 8.22) que apresentam comportamento de um canal sob influência da co-oscilação da maré (canal de maré) com elevada sinuosidade que desencadeou zonas de intensa erosão.

Os processos erosivos e deposicionais modificaram a seção geometria retangular original dos CDs para as formas triangular e trapezoidal. Nesse sentido, a deposição de finos provocou redução da profundidade dos CDs nas porções à montante onde as velocidades das correntes são menores. A sedimentação da fração areia ocorreu nas extremidades e centro dos canais, inclusive com formação de marcas de ondas.

Nas faixas centrais dos canais, onde os sedimentos são areno-lamosos desenvolve-se uma importante fauna de molusco, principalmente bivalves, que conferem uma estrutura rígida ao fundo do canal.

O volume erodido nos dois CDs, durante este estudo, foi de $2.155,20 \text{ m}^3/\text{ano}$ (Tabela 8.3), o qual é proveniente, principalmente, dos taludes dos viveiros que bordejam os canais e, em menor proporção, das planícies de marés (sedimentos

lamosos), entretanto essa diferenciação é difícil de ser estabelecida. Grande parte desse material (areia e lama), é transportada pelas correntes de marés em direção ao canal do Pisa Sal.

Antigas obras de contenção com carnaúbas e sacos de areia para deter o processo erosivo não foram eficazes, entretanto, em alguns trechos dos canais, funcionam como armadilhas para os sedimentos arenosos que caem dos taludes em blocos. Em outros trechos, principalmente nas margens côncavas dos meandros, desencadeiam fenômenos de erosão.

Outro fator que dificulta a ação erosiva das correntes é o desenvolvimento de uma franja de mangue (mangue invasor) no sopé dos taludes que bordejam os canais, bem como nas planícies de marés.

Por fim, a escavação e o represamento de canais em zonas de planícies de marés para carcinicultura e salinas modificam sobremaneira a hidrodinâmica local, contribuindo para a instalação de processos erosivos que alteram a morfologia local, contribuem para o assoreamento dos canais e provocam mortandade de espécies vegetais e animais com a redução do espaço geográfico das planícies de marés.

9 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO SISTEMA PISA SAL

Neste capítulo, será apresentada a estimativa da carga de sedimentos de fundo transportada por arraste, utilizando o método indireto de van Rijn (1984a) e a quantificação da carga de sedimentos em suspensão, a partir de medições diretas da concentração de sólidos suspensos em amostras de água.

Os métodos de estimativa de transporte de sedimentos são utilizados mais comumente em ambientes de correntes unidirecionais como rios. Entretanto, esses métodos podem ser aplicados em ambientes com correntes bidirecionais, como os estuários e canais de marés, nos quais as correntes de marés são importantes na hidrodinâmica local.

9.1 MÉTODOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

A carga total (Q_t) de sedimentos transportado por um rio refere-se à soma de sedimentos transportados por arraste de fundo (Q_f) e sedimentos de fundo transportados em suspensão (Q_s) (van Rijn, 1984a e 1984b). Este último corresponde ao material que entra em resuspensão a partir do fundo e o material oriundo da bacia hidrográfica.

A quantificação da carga de sedimentos de fundo e em suspensão pode ser efetuada com base em medidas diretas do transporte ou, indiretamente, a partir de formulações matemáticas. As medidas diretas da carga de fundo são realizadas a partir da coleta de sedimentos e da migração das formas de fundo. Por outro lado, as medidas diretas da carga em suspensão são realizadas através de amostras de água e quantificação da concentração de sólidos suspensos.

Existe grande quantidade de métodos indiretos para quantificação da carga transportada por rios que utilizam modelagem matemática. Alguns desses métodos estimam a carga de fundo (Q_f) e outros, a carga em suspensão (Q_s), obtendo-se pela somas dessas cargas, a carga total (Q_t).

Para a aplicação de um determinado método, deve-se levar em consideração as características locais do ambiente estudado, tais como: profundidade, largura e área da seção, velocidade do fluxo, vazão líquida e sólida, concentração de sedimentos suspensos, granulometria dos sedimentos de fundo, viscosidade cinemática da água,

densidade dos sedimentos e da água, características das formas de fundo, etc. É importante a utilização de dados de amostragem direta de sedimentos transportados por arraste de fundo e em suspensão para estabelecer a validação do método matemático utilizado, entretanto alguns métodos podem ser aplicados quando não existem dados de amostragem direta de sedimentos, como, por exemplo, o método de van Rijn (1984a e 1984b). Muitas vezes, a carga de sedimentos estimada pelos métodos mais comumente usados pode ser subestimada ou superestimada, quando comparada com a carga medida (Paiva, 1988, Ponce, 1990 e Paiva, 1995).

Devido às características locais, muitas vezes um determinado método não apresenta bons resultados para um determinado rio, enquanto, em outros, esses podem ser perfeitamente aplicados (Strobel *et al.* 1981 e Simons & Sentürk, 1992). Estudos de cálculo da descarga sólida de arraste de fundo desenvolvido por Strobel *et al.* (*op cit*) no ribeirão das Antas, Noroeste do Estado do Paraná, onde foram aplicados os métodos de Colby (1955), Meyer-Peter & Müller (1948), Kalinske (1942), Schoklitsch (1950), Shields (1936), Einstein (1950) e Yalin (1963), mostraram resultados diversificados e que não permitiram conclusões sobre a metodologia mais adequada para ser aplicada, concluindo os autores que muitos desses métodos utilizam formulações diferentes dos limites físicos da região estudada.

Amostragens de sedimentos de fundo e suspensão realizadas por Scapin (2005) com objetivo de monitorar a produção de sedimentos no arroio Cancela (Santa Maria-RS) permitiu avaliar e escolher os melhores métodos de cálculo de transporte de sedimentos em rios para ser aplicado no trecho estudado. Para isso, o referido autor comparou a razão (r) da descarga de sedimentos calculada e medida, além do índice de dispersão (ID). Os métodos que apresentaram os melhores resultados de (r) e (ID) foram: Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955), Colby (1957), Engelund e Hansen (1967), Yang (1973), Ackers e White (1973), Van Rijn (1984a e 1984b), Karim (1998) e Cheng (2002) (*apud* Scapin, 2005). O melhor método foi o de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955) que apresentou r variando de 0,54 a 1,32 e ID igual a 0,11 (ID varia de 0 a 10). O método de van Rijn apresentou r igual a 3,53 e o ID igual a 9,37. Esses valores são de qualidade inferior aos demais métodos, embora apresentem variação que permite sua aplicação.

Estudos desenvolvidos por Maia (1998) no estuário do rio Pacoti, localizado na zona metropolitana da cidade de Fortaleza-CE, permitiu conhecer o volume total de material transportado, a distribuição anual e a sua contribuição ao balanço sedimentar

costeiro. Para a estimativa da carga transportada no fundo, foram utilizados os métodos completo e simplificado de van Rijn (1984a), os quais apresentaram excelentes resultados. A quantificação da carga de sedimentos em suspensão foi realizada a partir do método direto de amostragem.

Estudando a produção e transporte de sedimentos no rio Mogi-Guaçu (São Carlos-SP), Paiva (1988) executou 23 campanhas de amostragens para determinação da concentração de sedimentos em suspensão, granulometria dos sedimentos de fundo e suspensão, descarga de fundo, declividade da linha d'água e descarga líquida. Paiva (*op cit*) utilizou 16 métodos indiretos para estimar o transporte de sedimentos, a saber: Meyer-Peter e Muller (1948), Einstein (1950), Einstein e Brown (1950), Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955), Colby (1957), Laursen (1958), Colby (1964), Bishop (1965), Engelund e Hansen (1967), Toffaleti (1969), Shen e Hung (1971), Einstein e Abdel Aal (1972), Yang (1973), Ackers e White (1973), Ranga Raju (1983) e van Rijn (1984). Os métodos de Einstein Modificado por Colby e Hembree (1955) e o método de Toffaleti (1969), apresentaram os melhores resultados da relação entre os valores da descarga de fundo calculados e os medidos, enquanto os métodos de Van Rijn (1984) e Toffaleti (1969) apresentaram os melhores resultados para estimativa indireta da descarga em suspensão. Os métodos de Ackers e White (1973) e Yang (1973) apresentaram os melhores resultados para estimativa indireta da carga total de material de fundo.

9.1.1 Método de van Rijn

O método indireto para estimativa da carga de transporte de fundo e suspensão desenvolvido por van Rijn (1984a e 1984b) foi baseado em experimentos de campo e de laboratório. Para a formulação do método de transporte de carga de fundo, utilizou 56 experimentos de campo e 534 dados laboratoriais (van Rijn, 1984a), enquanto, para método de transporte em suspensão, utilizou 486 dados de campo e 297 dados de laboratório (van Rijn, 1984b).

Os métodos de van Rijn (1984a e 1984b) fundamentam-se nos estudos de Bagnold (1966, *apud* van Rijn, *op cit*) que considera que o movimento das partículas no fundo é dominado pela força de gravidade, o efeito da turbulência é considerado de menor importância e que o transporte no fundo ocorre com o rolamento e saltação das partículas ao longo da superfície do leito. Determina a máxima altura teórica do salto da partícula em relação às condições de escoamento e assume que as partículas que

apresentam altura maior que a do máximo salto teórico, são transportadas em suspensão.

Baseado nos experimentos de campo e laboratoriais, van Rijn (*op. cit.*) determinou que a taxa de transporte da carga de sedimentos de fundo pode ser descrita com razoável precisão por dois parâmetros adimensionais: parâmetro da partícula (D_*) e o parâmetro de transporte (T), definidos como:

$$D_* = D_{50} [(s-1)g / \nu^2]^{1/3} \dots\dots\dots 9.1$$

e

$$T = \left[(u_*')^2 - (u_{*,cr})^2 \right] / (u_{*,cr})^2 \dots\dots\dots 9.2$$

onde: D_{50} é a mediana da granulometria; s é a densidade específica (ρ_s / ρ); ρ_s é a densidade do sedimento; ρ é a densidade da água; g é a aceleração da gravidade; ν é o coeficiente de viscosidade cinemática; u_*' é a velocidade efetiva de cisalhamento de fundo e $u_{*,cr}$ é a velocidade de cisalhamento crítica para início do movimento.

9.1.1.1 Início do Movimento das Partículas

Segundo van Rijn (1984a), o início do transporte de sedimentos no leito de um rio depende do tamanho das partículas de fundo e das condições do fluxo. A quantificação das condições para início do movimento das partículas pode ser realizada através de aproximações matemáticas descritas em Shields (1936), Miller *et al.* (1977), Ashworth & Ferguson (1989) e Parker (1990). Dentre estas, a mais utilizada é a de Shields (*op. cit.*), que utiliza nas aproximações a tensão tangencial crítica que definiu o parâmetro de mobilidade crítica ou Parâmetro de Shields (Φ_{cr}) como sendo:

$$\Phi_{cr} = (u_{*,cr})^2 / (s-1)gD_{50} \dots\dots\dots 9.3$$

As condições necessárias para início do movimento das partículas são estabelecidas pela relação entre os parâmetros de mobilidade crítica de Shields (Φ_{cr}) e o parâmetro de partícula de van Rijn (D_*). Primeiro, calcula-se o parâmetro adimensional de partícula e encontra-se o Φ_{cr} , utilizando as equações apresentadas

no diagrama de Shields (Figura 9.1). Em seguida, obtém-se a velocidade de cisalhamento crítica para o início do movimento ($u_{*,cr}$) e aplica-se na equação 9.3.

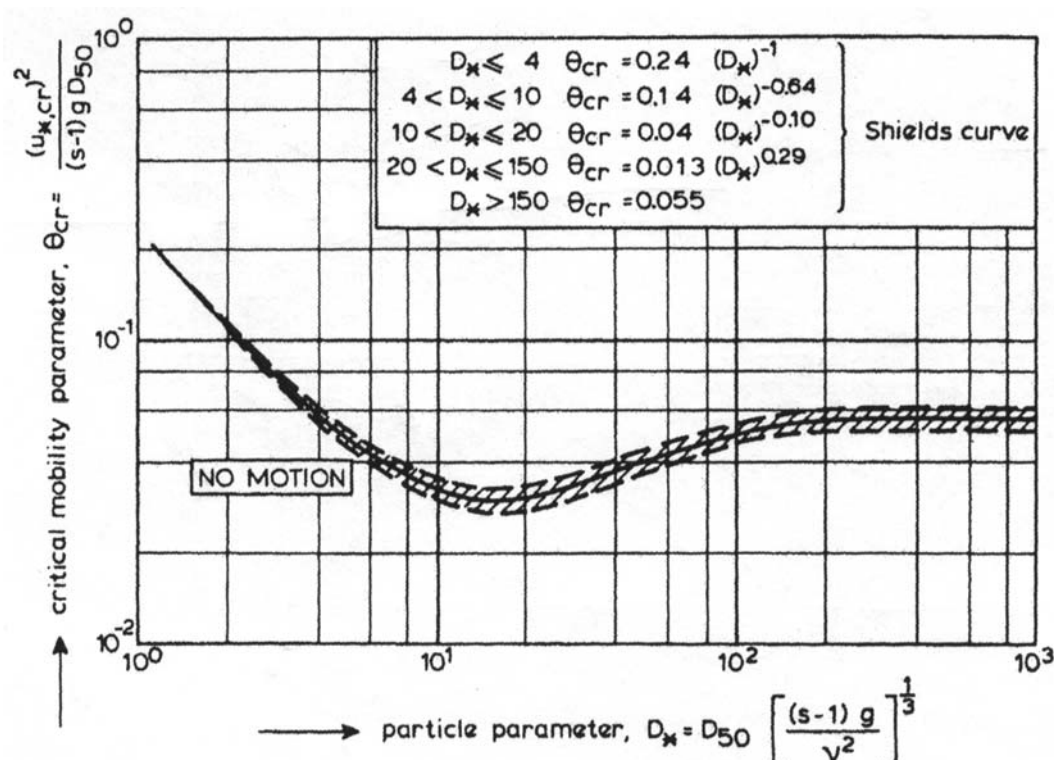


Figura 9.1. Diagrama de Shields (1936) para cálculo do parâmetro de mobilidade crítica (Φ_{cr}).

A velocidade efetiva de cisalhamento de fundo (u_*') é obtida a partir da velocidade média do fluxo ($\bar{u}$) e do coeficiente de Chezy (C) conforme as equações 9.4 e 9.5.

$$u_*' = (g^{0.5} / C) \bar{u} \dots\dots\dots 9.4$$

e

$$C = 18 \log(12Rb / Ks) \dots\dots\dots 9.5$$

onde: Rb é raio hidráulico relacionado ao fundo com correção das paredes laterais segundo o método de Vanoni e Brooks (1957) e Ks é a rugosidade equivalente ao grão e a forma de fundo (van Rijn, 1984c), obtida a partir do valor médio da *steepness* (Ψ) relativas as formas de fundo e do D_{90} dos sedimentos de fundo.

9.1.1.2 Transporte de Sedimentos e Balanço Sedimentar

Nesse trabalho, foi utilizado o método indireto para a estimativa da carga de fundo (Q_f) desenvolvido por van Rijn (1884a) e a carga em suspensão (Q_s) foi determinada a partir das concentrações de sólidos suspensos em amostras de água (Apêndice 9.1). A carga total é a soma de Q_f e Q_s .

A estimativa da carga de transporte de fundo (Q_f) é função dos parâmetros adimensionais de van Rijn (1984a): parâmetro de partícula (D_*) e o parâmetro de transporte (T), apresentados nesse trabalho, a qual é definida pela equação 9.6:

$$Q_f = 0,053 \left(T^{2,1} / D_*^{0,3} \right) [(s-1)g]^{0,5} D_{50}^{1,5} \dots\dots\dots 9.6$$

Para o cálculo da carga de fundo, foi utilizado o software WinTSR (Controle de Sedimentos em Rios), versão revisada em 03/05/2008.II, desenvolvido por Lucas Halberstadt da Rosa e Fábio Alex Beling sob a orientação do professor João Batista Dias de Paiva do Departamento de Hidráulica e Saneamento-UFSN com financiamento do CNPq.

Os dados de entrada para cálculo da descarga de fundo foram: largura média do escoamento (B), velocidade média de escoamento ($\bar{u}$), profundidade hidráulica (Ph), raio hidráulico (Rh), viscosidade cinemática da água ($\nu = 0,0000101 \text{ m}^2/\text{s}$), declividade da linha d'água (S) e diâmetros característicos das partículas do material de fundo (D_{16} , D_{35} , D_{50} , D_{65} , D_{84} e D_{90}).

A declividade da linha d'água (S) foi determinada pela equação de Manning (Equação 9.7):

$$S = \left(Qn / ARh^{2/3} \right)^2 \dots\dots\dots 9.7$$

onde: Q é a vazão líquida da seção ($A \times \bar{u}$), n é o coeficiente de Manning (rios limpos e retos = 0,05 e canais escavados com *drag-line* = 0,039, segundo Fendrich, 1988), A é área da seção e Rh é o raio hidráulico.

A determinação da carga de sedimentos transportada em suspensão (Q_s) foi calculada a partir da concentração de sólidos suspensos (C_{ss}) em amostras de água

superficial nas seções transversais do canal onde se localizam as estações E1 e E2, aplicando a equação 9.8.

$$Q_s = QC_{ss}K \dots\dots\dots 9.8$$

onde: Q é a vazão líquida da seção e K é o fator de conversão de unidades (0,0864, segundo Bowie e Mutchler, 1986).

9.2 CANAL PISA SAL

A estimativa de transporte de sedimentos por arraste de fundo e suspensão foi determinada a partir dos dados coletados nas estações E1 (foz) e E3 (cabeceira), de forma a melhor caracterizar o transporte ao longo de todo o canal. A figura 9.2 mostra a localização e a morfologia das seções transversais onde estão localizadas as estações.

O aporte fluvial no sistema Pisa Sal é nulo, ocorrendo apenas um insignificante escoamento superficial para o interior do canal no período das chuvas, tornando o transporte de sedimentos decorrente, exclusivamente, da co-oscilação da maré. Estudos realizados pela Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte-SERHID (1995) na foz do canal de Camurupim que se localiza a aproximadamente 2 km a W do Pisa Sal, a partir da série histórica compreendida entre 1936 a 1989 e aplicando o modelo chuva-deflúvio, determinou uma vazão média de 0,45 m³/s, indicando para a área a ocorrência de baixíssimos caudais.

A estimativa média mensal da carga de fundo e suspensão nas duas estações foi estabelecida a partir da velocidade média da componente longitudinal ($\bar{u}$) para os períodos de inverno e verão, durante as marés de quadratura e sizígia e nas fases de maré vazante e enchente, de forma a estabelecer o padrão de transporte de sedimentos em função da hidrodinâmica. Posteriormente, a carga de sedimentos transportada durante a vazante foi subtraída da carga transportada durante a enchente ($Q_{vz} - Q_{ec}$) para caracterizar a direção predominante do transporte, onde, valores positivos indicam transporte pela maré de vazante, e conseqüentemente, exportação de sedimentos na direção do canal de Galinhos. Valores negativos indicam transporte pela maré de enchente, evidenciando importação de sedimentos para o sistema Pisa Sal. Em seguida, foi calculada a média da carga exportada ou importada para as marés de quadratura e sizígia para os períodos de inverno e verão. A carga total (Q_t) foi

determinada pela soma de Q_f e Q_s . A carga total anual foi determinada, considerando-se o período de inverno de quatro meses (março a junho) e o período de verão de oito meses (julho a fevereiro). A tabela 9.1 apresenta as variáveis utilizadas no cálculo da carga de sedimentos transportada por arraste no fundo e a carga transportada em suspensão.

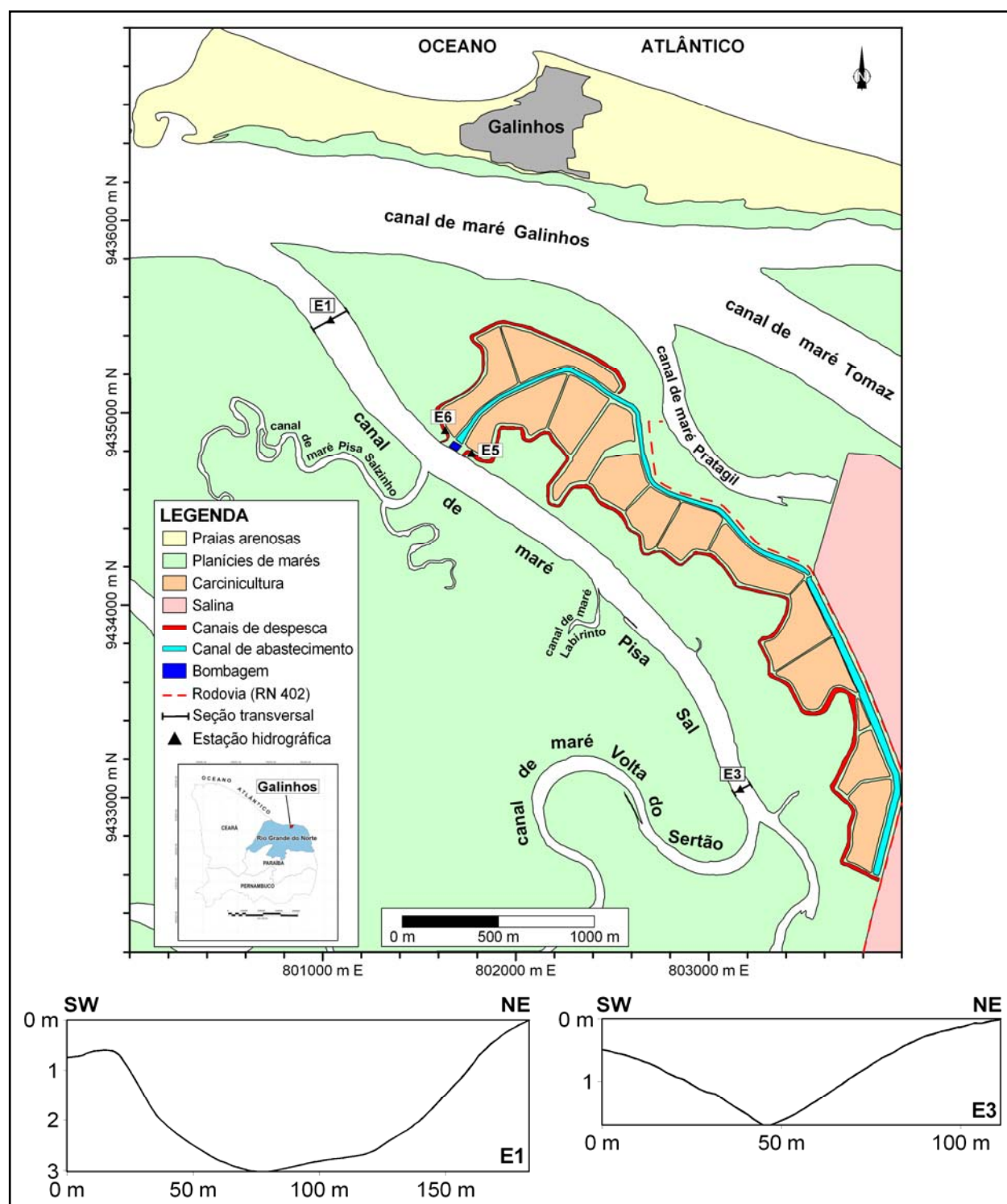


Figura 9.2. Mapa de localização das seções transversais ao canal d/o Pisa Sal nas estações E1, E3, E5 (CD1) e E6 (CD2) e seções transversais nas estações E1 e E3.

Tabela 9.1. Variáveis utilizadas no cálculo dos transportes de fundo (Q_f) e suspensão (Q_s) nas estações E1 e E3: velocidade média da componente longitudinal ($\bar{u}$), diâmetro referente a phi 50 e 90, densidade dos sedimentos de fundo (ρ_s), densidade da água (ρ), largura da superfície livre da água (B), profundidade média (d), área da seção (A), profundidade hidráulica (P_h), raio hidráulico (R_h), vazão líquida (Q), concentração de sólidos suspensos (C_{ss}), declividade da linha d'água (S), comprimento das formas de fundo (λ) e altura das formas de fundo (Δ).

Estações	ū m/s	Phi 50 mm	Phi 90 mm	ρ _s	ρ	B m	d m	A m²	P _h	R _h	Q m³/s	C _{ss} mg/l	S m/m	λ m	Δ m
				kg/m³					m						
E1 (iv, qd, vz)	0,23	0,316	0,935	26,50	1027,31	183,15	4,72	550,23	3,00	2,60	126,55	6,11	0,000037	7,50	0,58
E1 (iv, qd, ec)	0,18	0,316	0,935	26,50	1025,68	183,15	4,72	550,23	3,00	2,60	90,04	6,11	0,000023	7,50	0,58
E1 (iv, sz, vz)	0,36	0,316	0,935	26,50	1024,81	183,15	4,72	550,23	3,00	2,60	198,08	6,11	0,000091	7,50	0,58
E1 (iv, sz, ec)	0,32	0,316	0,935	26,50	1024,54	183,15	4,72	550,23	3,00	2,60	176,07	6,11	0,000072	7,50	0,58
E1 (vr, qd, vz)	0,19	0,614	2,000	26,50	1025,47	183,15	4,95	577,05	3,15	2,72	109,64	13,53	0,000024	7,50	0,58
E1 (vr, qd, ec)	0,17	0,614	2,000	26,50	1025,47	183,15	4,95	577,05	3,15	2,72	98,10	13,53	0,000019	7,50	0,58
E1 (vr, sz, vz)	0,35	0,614	2,000	26,50	1025,78	183,15	4,95	577,05	3,15	2,72	201,97	13,53	0,000081	7,50	0,58
E1 (vr, sz, ec)	0,31	0,614	2,000	26,50	1025,46	183,15	4,95	577,05	3,15	2,72	178,88	13,53	0,000063	7,50	0,58
E3 (iv, qd, vz)	0,21	0,292	0,821	26,50	1026,30	111,10	3,82	212,20	1,91	1,88	44,56	6,56	0,000048	23,00	1,42
E3 (iv, qd, ec)	0,16	0,292	0,821	26,50	1025,82	111,10	3,82	212,20	1,91	1,88	33,95	6,56	0,000028	23,00	1,42
E3 (iv, sz, vz)	0,41	0,292	0,821	26,50	1025,79	111,10	3,82	212,20	1,91	1,88	87,00	6,56	0,000181	23,00	1,42
E3 (iv, sz, ec)	0,28	0,292	0,821	26,50	1025,83	111,10	3,82	212,20	1,91	1,88	59,42	6,56	0,000084	23,00	1,42
E3 (vr, qd, vz)	0,19	0,925	2,300	26,50	1027,31	111,10	3,94	218,87	1,97	1,94	41,58	5,72	0,000037	23,00	1,42
E3 (vr, qd, ec)	0,16	0,925	2,300	26,50	1027,44	111,10	3,94	218,87	1,97	1,94	35,02	5,72	0,000026	23,00	1,42
E3 (vr, sz, vz)	0,34	0,925	2,300	26,50	1027,07	111,10	3,94	218,87	1,97	1,94	74,41	5,72	0,000119	23,00	1,42
E3 (vr, sz, ec)	0,30	0,925	2,300	26,50	1026,79	111,10	3,94	218,87	1,97	1,94	65,66	5,72	0,000093	23,00	1,42

iv (inverno), vr (verão), qd (quadratura), sz (sizígia), vz (vazante) e ec (enchente).

O método completo de van Rijn (1984a) para determinação da carga de fundo apresenta limitações para sua aplicação que dependem, principalmente, da velocidade da corrente (Capítulo 7 - Correntes e Propriedades Termohalinas do Sistema Pisa Sal, Tabela 7.2), da granulometria do sedimento (Capítulo 6 - Caracterização Faciológica e Textural do Sistema Pisa Sal, Figuras 6.2 e 6.9) e da profundidade.

Velocidades baixas da componente longitudinal tendem a gerar baixas velocidades de cisalhamento de fundo relacionado ao grão (u^*) que não permite ocorrer transporte. Nesse sentido, para que ocorra transporte de fundo à velocidade de cisalhamento de fundo relacionado ao grão (u^*) deve ser maior que a velocidade crítica de cisalhamento para início do movimento (u^*_{cr}) para que o parâmetro de transporte (T) de van Rijn seja positivo. A velocidade mínima da componente longitudinal para iniciar o transporte de sedimentos está apresentada na tabela 9.2.

Tabela 9.2. Velocidade média da componente longitudinal ($\bar{u}$) e parâmetros para cálculo da carga de fundo (Q_t) segundo van Rijn (1984a): velocidade de cisalhamento de fundo relacionado ao grão (u^*), velocidade crítica de cisalhamento de fundo para início do movimento (u^*_{cr}), velocidade mínima média da componente longitudinal para ocorrer transporte ($\bar{u}_{min}$), parâmetro da Partícula (D^*), parâmetro de Transporte (T), relação entre a velocidade de queda da partícula (W_s) e a velocidade geral de cisalhamento de fundo (u^*), e a as formas de fundo geradas em cada período estudado nas estações E1 e E3.

Estações	$\bar{u}$	u^*	u^*_{cr}	$\bar{u}_{min}$	D^*	T	Forma de fundo
	m/s						
E1 (iv, qd, vz)	0,23	0,01315	0,01366	0,27	7,8682	-0,0740	sem movimento
E1 (iv, qd, ec)	0,18	0,01028	0,01368	0,29	7,8750	-0,4483	sem movimento
E1 (iv, sz, vz)	0,36	0,02059	0,01368	0,22	7,8787	1,2654	marcas de ondas
E1 (iv, sz, ec)	0,32	0,01830	0,01369	0,23	7,8798	0,7888	marcas de ondas
E1 (vr, qd, vz)	0,19	0,01177	0,01721	0,34	15,3032	-0,5319	sem movimento
E1 (vr, qd, ec)	0,17	0,01053	0,01721	0,35	15,3032	-0,6254	sem movimento
E1 (vr, sz, vz)	0,35	0,02170	0,01721	0,35	15,3007	0,5907	duna
E1 (vr, sz, ec)	0,31	0,01922	0,01721	0,31	15,3033	0,2472	sem movimento
E3 (iv, qd, vz)	0,21	0,01245	0,01348	0,30	7,2746	-0,1472	sem movimento
E3 (iv, qd, ec)	0,16	0,00947	0,01348	0,33	7,2764	-0,5062	sem movimento
E3 (iv, sz, vz)	0,41	0,02433	0,01348	0,23	7,2765	2,2576	marcas de ondas
E3 (iv, sz, ec)	0,28	0,01661	0,01348	0,27	7,2764	0,5175	marcas de ondas
E3 (vr, qd, vz)	0,19	0,01269	0,00687	0,43	23,0321	2,4157	sem forma
E3 (vr, qd, ec)	0,16	0,01069	0,00687	0,36	23,0304	1,4218	sem forma
E3 (vr, sz, vz)	0,34	0,02272	0,00687	0,34	23,0350	9,9404	duna
E3 (vr, sz, ec)	0,30	0,02005	0,00687	0,36	23,0384	7,5122	sem forma

iv (inverno), vr (verão), qd (quadratura), sz (sizígia), vz (vazante) e ec (enchente).

A seguir, serão apresentados os resultados referentes às cargas de sedimentos transportados por araste de fundo (Q_f), em suspensão (Q_s) e carga total (Q_t), a partir das velocidades médias assim como a estimativa de transporte, considerando-se as velocidades máxima médias das correntes de vazante e enchente que ocorrem 1 a 2 horas antes e depois da estofa de enchente.

9.2.1 Carga de Fundo (Q_f)

O transporte de fundo nas duas estações ocorre, exclusivamente, nas marés de vazante e enchente de sizígia, durante o inverno e o verão. De uma forma geral, as maiores cargas são transportadas no inverno, na vazante de sizígia.

Na estação E1, o transporte de fundo ocorre durante as vazantes e enchentes de sizígia nos períodos de inverno e verão. O transporte durante as vazantes é maior que durante as enchentes, com uma carga média de sedimentos exportada no inverno na ordem de $139,41 \text{ m}^3/\text{mês}$ e no verão $76,64 \text{ m}^3/\text{mês}$ (Tabela 9.3). Na estação E3 (cabeceira), o transporte ocorre, principalmente, durante o inverno, nas marés de sizígia e nos ciclos de vazante. No período de verão, uma pequena carga é transportada na vazante de sizígia (Tabela 9.3). A carga média exportada no inverno é bastante superior à carga de verão, alcançando $397,56 \text{ m}^3/\text{mês}$ contra $0,46 \text{ m}^3/\text{mês}$, respectivamente (Tabela 9.3).

A carga de fundo anual transportada pelas estações E1 e E3 é da ordem de $1.170,76$ e $1.593,92 \text{ m}^3$, respectivamente, conferindo à estação E3 um transporte superior à estação E1 na ordem de 26,55 %.

As velocidades máximas médias no canal Pisa Sal ocorrem a aproximadamente 1 a 2 horas antes e após a estofa de enchente, como descrito no Capítulo 7- Correntes e Propriedades Termohalinas do Sistema Pisa Sal. Assim, a velocidade máxima da corrente e o aumento da lâmina d'água decorrente da proximidade da estofa de enchente criam um ambiente favorável ao intenso transporte de sedimentos e com migração e/ou destruição das formas de leito. A tabela 9.4 mostra que a carga média exportada nas estações E1 e E3 são maiores no inverno, a qual apresenta valores respectivos de $15.156,07 \text{ m}^3/\text{mês}$ e $16.792,26 \text{ m}^3/\text{mês}$.

Tabela 9.3. Volume de sedimentos ($\text{m}^3/\text{mês}$) transportado como carga de fundo (Qf), carga em suspensão (Qs) e carga total (Qt) de sedimentos de fundo durante o inverno (iv) e verão (vr) nos ciclos de quadratura (qd) e sizígia (sz) e nas fases de vazante (vz) e enchente (ec) considerando a velocidade média da componente longitudinal da corrente ($\bar{u}$) nas estações E1 e E3 no canal do Pisa Sal, Galinhos-RN.

Estações	ū	D50	Qf		Qs		Qf	Qs	Qf	Qs	Qt	Qt			
			vz	ec	vz	ec	(vz - ec)	(vz - ec)	(média)	(média)	(Qf + Qs)				
	m/s	mm	m³/mês									m³/ano			
E1 (iv, qd)	0,23	0,316	0,00		756,32		0,00	164,42	139,41	147,98	287,38	3.595,38			
E1 (iv, qd)	0,18	0,316		0,00		591,90									
E1 (iv, sz)	0,36	0,316	433,78		1.183,81		278,81	131,53							
E1 (iv, sz)	0,32	0,316		154,97		1.052,27									
E1 (vr, qd)	0,19	0,614	0,00		1.450,95		0,00	152,73	76,64	229,10	305,72				
E1 (vr, qd)	0,17	0,614		0,00		1.298,21									
E1 (vr, sz)	0,35	0,614	174,44		2.672,79								153,270	305,46	
E1 (vr, sz)	0,31	0,614		21,17		2.367,33									
E3 (iv, qd)	0,21	0,292	0,00		285,93		0,00	68,08				397,56	122,54	520,10	2.426,91
E3 (iv, qd)	0,16	0,292		0,00		217,85									
E3 (iv, sz)	0,41	0,292	827,72		558,24		795,12	177,00							
E3 (iv, sz)	0,28	0,292		32,60		381,24									
E3 (vr, qd)	0,19	0,925	0,00		232,66		0,00	36,74	0,46	42,86	43,31				
E3 (vr, qd)	0,16	0,925		0,00		195,92									
E3 (vr, sz)	0,34	0,925	0,91		416,34							0,91	48,98		
E3 (vr, sz)	0,30	0,925		0,00		367,36									

* Valores positivos na relação (vz - ec) indicam predominância da maré de vazante (exportação de sedimento) e valores negativos indicam predominância da maré de enchente (importação de sedimentos). Para o cálculo da carga total (Qt) anual foi considerado quatro meses de inverno e oito meses de verão. $\bar{u}$ (velocidade média da coluna d'água), D50 (mediana dos sedimentos), Qf (carga de sedimentos de fundo), Qs (carga de sedimentos em suspensão) e Qt (carga total de sedimentos). Qt anual= (Qf iv x 4 meses) + (Qf vr x 8 meses), considerar a mesma relação para Qf e Qs.

Tabela 9.4. Volume de sedimentos ($\text{m}^3/\text{mês}$) transportado como carga de fundo (Qf), carga em suspensão (Qs) e carga total (Qt) de sedimentos de fundo durante o inverno (iv) e verão (vr) nos ciclos de quadratura (qd) e sizígia (sz) e nas fases de vazante (vz) e enchente (ec) considerando a velocidade máxima média da componente longitudinal da corrente ($\bar{u}$) nas estações E1 e E3 no canal do Pisa Sal, Galinhos-RN.

Estações	ū	D50	Qf		Qs		Qf	Qs	Qf	Qs	Qt	Qt
			vz	ec	vz	ec	(vz-ec)	(vz-ec)	(média)	(média)	(Qf + Qs)	
	m/s	mm	m³/mês									
E1 (inv, qd)	0,52	0,316	4.371,44		1.709,94		4.165,08	624,79	15.156,07	674,11	15.830,18	104.325,26
E1 (inv, qd)	0,33	0,316		206,36		1.085,15						
E1 (inv, sz)	0,78	0,316	32.603,75		2.564,91		26.147,05	723,44				
E1 (inv, sz)	0,56	0,316		6.456,70		1.841,47						
E1 (ver, qd)	0,41	0,614	813,34		3.130,99		812,44	916,39	4.323,73	801,84	5.125,57	
E1 (ver, qd)	0,29	0,614		0,91		2.214,60						
E1 (ver, sz)	0,65	0,614	14.152,49		4.963,76		7.835,02	687,29				
E1 (ver, sz)	0,56	0,614		6.317,47		4.276,47						
E3 (inv, qd)	0,50	0,292	2.573,94		680,79		2.522,55	285,93	16.792,26	347,20	17.139,46	117.817,66
E3 (inv, qd)	0,29	0,292		51,39		394,86						
E3 (inv, sz)	0,86	0,292	35.710,52		1.170,95		31.061,97	408,47				
E3 (inv, sz)	0,56	0,292		4.648,56		762,48						
E3 (ver, qd)	0,34	0,925	0,91		416,34		0,91	61,23	5.967,68	189,80	6.157,48	
E3 (ver, qd)	0,29	0,925		0,00		355,11						
E3 (ver, sz)	0,75	0,925	12.864,27		918,39		11.934,45	318,37				
E3 (ver, szg)	0,49	0,925		929,82		600,01						

* Valores positivos na relação (vz - ec) indicam predominância da maré de vazante (exportação de sedimento) e valores negativos indicam predominância da maré de enchente (importação de sedimentos). Para o cálculo da carga total (Qt) anual foi considerado quatro meses de inverno e oito meses de verão. $\bar{u}$ (velocidade média da coluna d'água), D50 (mediana dos sedimentos), Qf (carga de sedimentos de fundo), Qs (carga de sedimentos em suspensão) e Qt (carga total de sedimentos). Qt anual= (Qf iv x 4 meses) + (Qf vr x 8 meses), considerar a mesma relação para Qf e Qs.

9.2.2. Carga em Suspensão (Qs)

A carga de sedimentos em suspensão ocorre em todos os períodos estudados e em todos os ciclos de marés. Entretanto, o transporte mais importante é observado durante as marés de vazante, seja na estação E1 ou E3, indicando exportação de sedimentos a partir do sistema Pisa Sal. De forma geral, a quantidade de sedimentos em suspensão exportada na desembocadura do canal (E1) é maior que na região de cabeceira (E3) (Tabela 9.3).

Durante o inverno, a E1 transporta na quadratura e sizígia quantidades aproximadamente iguais de sedimentos suspensos, na ordem de 164,42 e 131,53 m³/mês, respectivamente. Por outro lado, essa situação inverte-se no verão, passando a transportar 152,73 m³/mês na quadratura e 305,46 m³/mês na sizígia. Em média, a E1 exporta mais sedimentos em suspensão durante o inverno com taxas de 147,98 m³/mês, enquanto, durante o verão, a taxa aumenta para 229,10 m³/mês (Tabela 9.3).

A quantidade de sedimentos em suspensão transportada na E3 diminui em relação a E1, entretanto mantém a predominância da vazante sobre a enchente. No inverno, a carga transportada na sizígia é maior que na quadratura com valores respectivos de 177,00 e 68,08 m³/mês, enquanto, no verão, essas cargas são, aproximadamente, iguais: 48,98 m³/mês (sizígia) e 36,74 m³/mês (quadratura). Com isso, a carga média respectiva exportada durante o inverno e verão é de 122,54 e 42,86 m³/mês (Tabela 9.3).

A carga em suspensão anual exportada nas estações E1 e E3 é de 2.424,72 e 833,04 m³, respectivamente (Tabela 9.3), conferindo a estação E1 um transporte superior à estação E3 na ordem de 52,34 %. Por sua vez, a média exportada em suspensão, considerando as velocidades máximas médias, nas estações E1 e E3 são 801,84 m³/mês (verão) e 347,20 m³/mês (inverno), respectivamente (Tabela 9.4).

9.2.3 Carga Total (Qt)

A carga total (Qt) exportada na desembocadura (E1) do canal do Pisa Sal durante o inverno e o verão é, aproximadamente, igual, com valores médios na ordem de 287,38 m³/mês no inverno e 305,73 m³/mês no verão, enquanto, na região da cabeceira (E3), essa carga, no inverno, é significativamente superior à do verão, apresentando valores respectivos de 520,10 m³/mês e 43,31 m³/mês (Tabela 9.3).

A carga total anual exportada pelas estações E1 e E3 é da ordem de 3.595,48 e 2.426,96 m³, respectivamente (Tabela 9.3), o que confere à estação E1 uma taxa de

exportação 48,15 % superior a estação E3. Considerando a velocidade máxima média, as referidas estações exportam, respectivamente, 104.325,26 e 117.817,66 m³/ano.

9.3 CANAIS DE DESPESCA (CDs)

O estudo da quantidade de sedimentos transportados anualmente pelos canais de despesca das fazendas de cultivo de camarões é importante para o conhecimento dos processos de assoreamento dos estuários e, conseqüentemente, no transporte de sedimentos para a zona costeira. Entretanto, a indisponibilidade de condições permitiu a realização de levantamento de dados somente durante o inverno, na maré de sizígia e nos ciclos de vazante e enchente, período de maior variação nas correntes de marés.

A fazenda da Camarus Aquicultura do Nordeste Ltda. possui dois canais de despesca (CDs) que foram dragados nas planícies de intermaré e supramaré e servem para fazer a drenagem da água dos viveiros (efluentes) para o canal do Pisa Sal durante a despesca. Os referidos canais sofrem influência permanente do fluxo das marés e comportam-se como verdadeiros canais de marés. O CD1 e o CD 2 apresentam extensões de 5.000 e 1.700m, respectivamente. O perfil original apresenta forma transversal retangular com largura e profundidade médias de 10 m e 2,5 m, respectivamente. Atualmente, esses canais mostram uma forma, aproximadamente, trapezoedral (E5) e triangular (E6) (Figura 9.4).

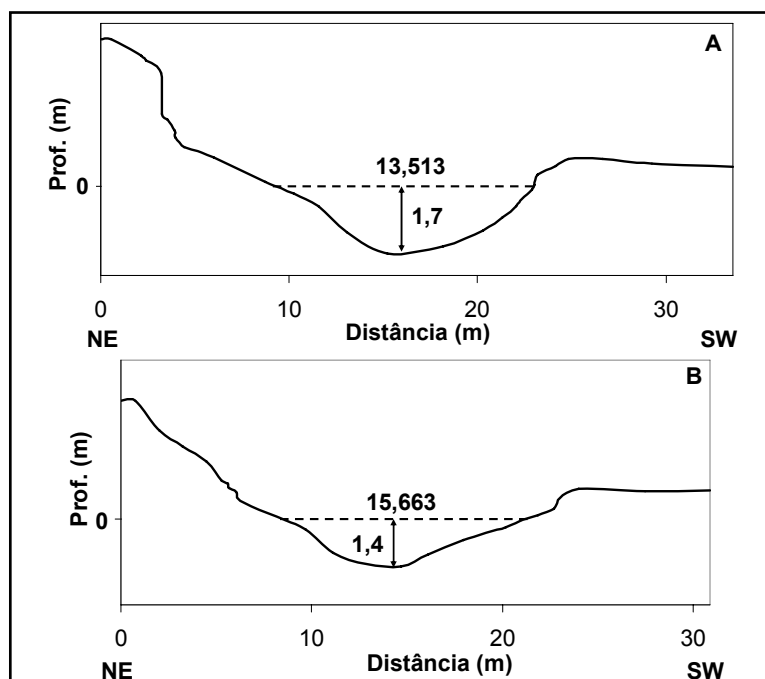


Figura 9.4. Seção transversal dos CDs nas estações E5 e E6 com suas respectivas larguras e profundidades médias. A localização das respectivas seções está na figura 9.2.

As velocidades médias das correntes de marés de vazante e enchente foram obtidas a partir de medições nas estações E5 (CD1) e E6 (CD2) (Figura 9.2) durante o período de inverno na maré de sizígia e nos ciclos de vazante e enchente com S4, como apresentado no Capítulo - Caracterização da Erosão no Sistema Pisa Sal.

A tabela 9.5 apresenta as variáveis utilizadas no cálculo da carga de sedimentos transportada por arraste no fundo e a carga transportada em suspensão, cujas metodologias aplicadas são as mesmas utilizadas para o canal do Pisa Sal.

Tabela 9.5. Variáveis utilizadas no cálculo dos transportes de fundo (Q_f) e suspensão (Q_s) nas estações E5 e E6 no período de inverno (iv) na maré sizígia (sz) e ciclo de vazante (vz) e enchente (ec): velocidade média da componente longitudinal ($\bar{u}$), diâmetro referente a phi 50 e 90, densidade dos sedimentos de fundo (ρ_s), densidade da água (ρ), largura da superfície livre da água (B), profundidade média (d), área da seção (A), profundidade hidráulica (P_h), raio hidráulico (R_h), vazão líquida (Q), concentração de sólidos suspensos (C_{ss}), declividade da linha d'água (S), comprimento das formas de fundo (λ) e altura das formas de fundo (Δ).

Variáveis	Unidades	Estações			
		E5		E6	
		(sz, vz)	(sz, ec)	(sz, vz)	(sz, ec)
$\bar{u}$	m/s	0,27	0,20	0,16	0,13
Phi 50	mm	0,226	0,226	0,122	0,122
Phi 90	μm	0,424	0,424	0,406	0,406
ρ_s	(kg/m^3)	2650,00	2650,00	2650,00	2650,00
ρ	(kg/m^3)	1024,56	1024,56	1024,56	1024,56
B	m	13,51	13,51	15,66	15,66
d	m	1,70	1,70	1,40	1,40
A	m ²	16,78	16,78	16,71	16,71
Ph	m	1,24	1,24	1,07	1,07
Rh	m	1,10	1,10	0,88	0,88
Q	m ³ /s	4,53	3,36	2,67	2,17
C_{ss}	mg/l	10,78	10,78	4,33	4,33
S	m/m	0,008379	0,006206	0,005738	0,004672
λ	m	0,1193	0,1193	0,1193	0,1193
Δ	m	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102

A tabela 9.6 apresenta a velocidade de cisalhamento de fundo relacionada ao grão (u^*), à velocidade crítica de cisalhamento para início do movimento (u^*_{cr}), à velocidade mínima da componente longitudinal para iniciar o transporte de sedimentos, os parâmetros da partícula (D^*) e de transporte (T) de van Rijn e às formas de leito geradas.

Tabela 9.6. Velocidade média da componente longitudinal ($\bar{u}$) e parâmetros para cálculo da carga de fundo (Q_t) segundo van Rijn (1984a): velocidade de cisalhamento de fundo relacionado ao grão (u'^*), velocidade crítica de cisalhamento de fundo para início do movimento (u^*_{cr}), velocidade mínima média da componente longitudinal para ocorrer transporte ($\bar{u}_{min}$), parâmetro da Partícula (D^*), parâmetro de Transporte (T) e relação entre a velocidade de queda da partícula (Ws) e a velocidade geral de cisalhamento de fundo nas estações E5 e E6 no período de inverno (iv) na maré sizígia (sz) e ciclo de vazante (vz) e enchente (ec).

Estações	$\bar{u}$	u'^*	$u^*_{,cr}$	$\bar{u}_{min}$	D^*	T	Forma de fundo
	m/s						
E5 (iv, sz, vz)	0,27	0,02503	0,01430	0,10	10,1239	2,2130	dunas
E5 (iv, sz, ec)	0,20	0,02044	0,01430	0,13	10,1239	1,0439	dunas
E6 (iv, sz, vz)	0,16	0,01443	0,01268	0,14	5,1617	0,2944	marcas de ondas
E6 (iv, sz, ec)	0,13	0,01227	0,01268	0,16	5,1617	-0,0634	sem movimento

9.3.1 Carga de Fundo (Q_f)

O transporte de fundo nas estações, durante as marés de sizígia, no período de inverno, ocorre mais fortemente durante as marés de vazante, evidenciando exportação de sedimentos de fundo dos canais de despesca para o rio Pisa Sal. De uma forma geral, na estação E5 (CD1), a carga transportada é maior que na estação E6 (CD2) (Tabela 9.7).

A estação E5 exporta, durante o inverno, 116,37 m³/mês, enquanto a estação E6 exporta 0,79 m³/mês, conferindo, à estação E5, um transporte de fundo 149,3 vezes superior à estação E6 (Tabela 9.7).

Tabela 9.7. Volume de sedimentos (m³/mês) transportado como carga de fundo (Q_f), carga em suspensão (Q_s) e carga total (Q_t) de sedimentos de fundo durante o inverno (iv) na maré sizígia (sz) e ciclo de vazante (vz) e enchente (ec) considerando a velocidade média da componente longitudinal da corrente ($\bar{u}$) nas estações E5 e E6 nos CD1 e CD2, respectivamente.

Estações	$\bar{u}$	D50	Qf		Qs		Qf	Qs	Qt
			vz	ec	vz	ec	(vz - ec)	(vz - ec)	(média)
	m/s	mm	m ³ /mês						
E5 (iv, sz)	0,27	0,226	145,12		47,76		116,37	12,38	128,75
E5 (iv, sz)	0,20	0,226		28,75		35,38			
E6 (iv, sz)	0,16	0,122	0,79		14,16		0,79	4,96	5,75
E6 (iv, sz)	0,13	0,122		0,0		9,21			

Considerando a velocidade máxima média, as estações E5 e E6 transportam como carga de fundo de 672,18 e 28,07 m³/mês, respectivamente (Tabela 9.8). A carga transporta na estação E5 é 24 vezes superior à carga transportada na estação E6.

Tabela 9.8. Volume de sedimentos (m³/mês) transportado como carga de fundo (Qf), carga em suspensão (Qs) e carga total (Qt) de sedimentos de fundo durante o inverno (iv) na maré sizígia (sz) e ciclo de vazante (vz) e enchente (ec) considerando a velocidade máxima média da componente longitudinal da corrente ($\bar{u}$) nas estações E5 e E6 nos CD1 e CD2, respectivamente.

Estações	$\bar{u}$	D50	Qf		Qs		Qf	Qs	Qt
			vz	ec	vz	ec	(vz - ec)	(vz - ec)	(média)
	m/s	mm	m ³ /mês						
E5 (iv, sz)	0,61	0,406	3.936,64		107,90		672,18	5,31	677,49
E5 (iv, sz)	0,58	0,406		3.264,46		102,59			
E6 (iv, sz)	0,30	0,207	97,58		21,25		28,07	1,42	29,49
E6 (iv, sz)	0,28	0,207		69,50		19,83			

Os parâmetros partícula D^* e T de van Rijn para as velocidades médias indicam que, na estação E5 (CD1), são geradas formas de leito do tipo dunas. O valor de $D^* = 10,1$ (Tabela 9.6) encontra-se 0,1 após o limite para formação de dunas (10), ou seja, na zona de transição entre marcas de ondas e dunas (Figura 9.5). Observações de campo, não identificaram a presença de dunas, entretanto *ripples* de composição arenosa com comprimento variando de 0,08 a 0,18 m e altura variando de 0,7 a 2,0 cm, com sentido do deslocamento para vazante, foram registradas em regiões de meandros. Na estação E6, foram identificadas pequenas *ripples* com sentido para vazante, entretanto, na maior parte do canal, ocorre fundo plano, onde as baixas velocidades não favorecem o transporte, ocorrendo deposição de lamas.

Em relação às velocidades máximas médias, observa-se a formação de dunas na estação E5 com tendência à zona de transição, entretanto essas formas de leito não são identificadas em campo. Por sua vez, a estação E6 encontra-se no domínio das *ripples*, seja no ciclo de vazante ou enchente (Figura 9.5).

9.3.2 Carga em Suspensão (Qs)

A carga de sedimentos em suspensão estimada nas duas estações é relativamente baixa. Estes sedimentos são transportados, predominantemente, pelas marés de vazante, indicando exportação de sedimentos.

As cargas exportadas em suspensão nas estações E5 e E6 são da ordem de 12,38 m³/mês e 4,96 m³/mês, respectivamente, o que representa para a estação E5 uma taxa de transporte 2,5 vezes superior à estação E6 (Tabela 9.7).

Em relação à velocidade máxima média, a estação E5 (5,31 m³/mês) exporta 3,7 vezes mais sedimentos em suspensão que a E6 (1,42 m³/mês). As pequenas taxas de transporte devem-se às baixas concentrações de sólidos suspensos na água.

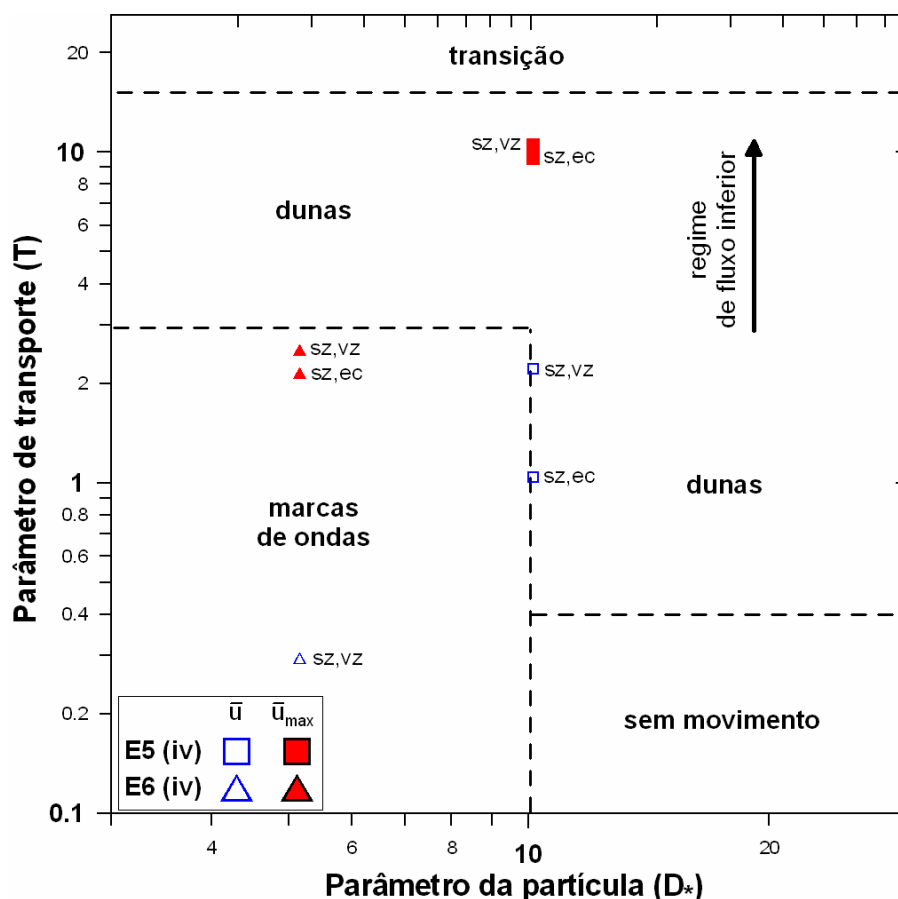


Figura 9.5. Diagrama de classificação de formas de fundo em regime de fluxo inferior e transicional nas estações E5 e E6 segundo os parâmetros da partícula (D_*) e de transporte (T) (modificado de van Rijn, 1984c). Legendas em azul referem-se às formas de fundo definidas a partir da velocidade média (m/s) da componente longitudinal ($\bar{u}$) na coluna d'água. Legendas em vermelho referem-se às formas de fundo definidas a partir da velocidade máxima média (m/s) da componente longitudinal ($\bar{u}_{max}$). iv (inverno), vr (verão), qd (quadratura), sz (sizígia), vz (vazante) e ec (enchente). Os períodos que não estão representados devem-se aos valores negativos de T (sem transporte).

9.3.3 Carga Total (Q_t)

A carga total de sedimentos transportada na estação E5 é 22 vezes maior que na estação E6, com valores respectivos na ordem de 128,75 e 5,75 m³/mês, o que confere para os 4 meses de inverno uma carga para essas estações de 515,00 e

23,00 m³. Considerando a velocidade máxima média, a carga exportada pela E5 (677,49 m³/mês) é 23 vezes superior a E6 (29,49 m³/mês).

9.3 DISCUSSÕES

O transporte de sedimentos de fundo e suspensão no sistema Pisa Sal é controlado pela variação da velocidade das correntes de marés. O transporte é mais eficiente durante as marés de sizígia e nos ciclos de vazante.

De uma forma geral, não existe relação direta do aumento do transporte em função dos períodos de chuva e estiagem, uma vez que o fluxo fluvial é nulo e o volume anual precipitado é muito baixo, concentrando-se no período de março a junho, chegando a provocar, nesse período, um incipiente escoamento superficial em direção ao canal, porém de difícil quantificação.

O mecanismo de exportação de sedimentos é, predominante, no sistema Pisa Sal, transportando-os em direção à linha de costa para alimentar os bancos arenosos e lamosos da foz do complexo estuário lagunar de Galinhos-Guamaré.

A carga anual de transporte por arraste de fundo na estação E3 é 26,55 % superior à da estação E1, enquanto a carga transportada em suspensão pela estação E1 é 52,34 % superior à estação E3.

A elevada carga de transporte de fundo na estação E3 indica que a região à sua montante encontra-se em forte erosão, como apresentado no Capítulo 8 - Caracterização da Erosão no Sistema Pisa Sal. Por sua vez, na região compreendida entre a E1 (desembocadura) e a E3 (cabeceira) os processos erosivos são ineficientes, uma vez que a carga de fundo não sofreu aumento.

Estudos realizados por Maia (1998) no estuário do rio Pacoti (CE), que tem um comprimento de 19 km e bacia hidrográfica com área de 778 km². O referido autor considerou velocidades médias mínimas para calcular as taxas anuais de exportação de sedimentos de fundo para a deriva litorânea, que variou de 21.000 a 31.000 m³, as quais foram estimadas a partir do método completo de van Rijn (1984a). O rio Pacoti apresenta conteúdo médio de sólidos suspensos, variando entre 40 e 100 mg/l, com mínimos e máximos na ordem de 25 e 345 mg/l, mostrando um balanço anual positivo na ordem de 16.000 m³. Estes resultados mostram a aplicabilidade do método de van Rijn em uma região de fluxo bidirecional (estuário), o que vem a ser corroborado no presente estudo.

A elevada carga de sedimentos em suspensão exportada na estação E1 deve-se a dois mecanismos distintos: o primeiro refere-se à velocidade das correntes de marés na seção e o segundo refere-se ao transporte marginal das lamas resuspensas pela ação de pequenas marolas formadas pela atividade do vento na superfície da água. Este mecanismo é eficiente, quando ocorre a ação conjunta dos ventos de SE e as fortes correntes de vazante.

Uma estreita faixa de aproximadamente 3 a 5 m a partir da linha d'água em direção ao centro do canal, com profundidade variando de zero a aproximadamente 1,0 metro, sofre ação de pequenas marolas que provocam resuspensão das lamas que são exportadas pelas correntes de vazante na forma de uma pluma de sedimentos (Figura 9.6).

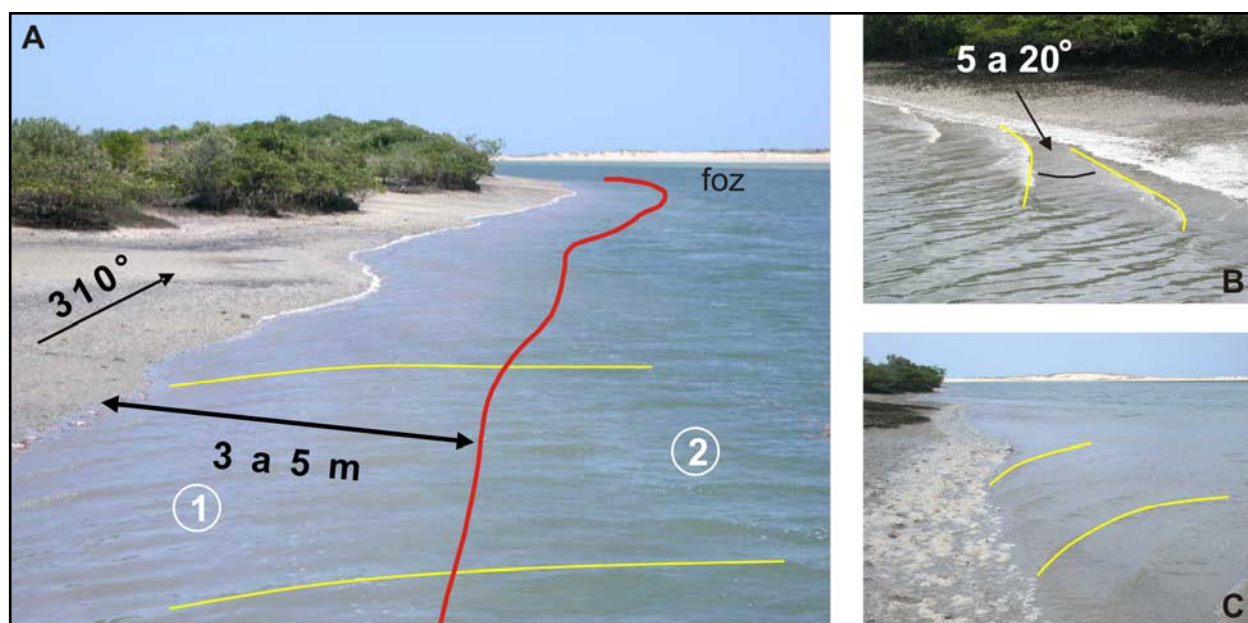


Figura 9.6. Pluma de sedimentos em suspensão na margem esquerda do canal Pisa Sal em frente a estação E1 (A), detalhe do ângulo de chegada da onda na margem (B e C). A linha vermelha delimita a pluma de sedimentos em suspensão e as linhas amarelas identificam a crista das pequenas ondas (marolas) em direção à foz.

Amostras de água coletadas dentro e fora da pluma (margem esquerda e direita do canal) mostram grandes variações nas concentrações. Variações também ocorrem em relação às margens, onde a margem esquerda é mais exposta a ação dos ventos SE e as concentrações são superiores à margem direita. A tabela 9.9 apresenta as concentrações no interior e fora da pluma bem como nas margens esquerda e direita. Em alguns casos, como em maio de 2006, a pluma da margem esquerda do canal Pisa Sal apresenta uma concentração de sedimentos suspensos 48 vezes

superior que a zona fora da pluma. Entretanto, é difícil a determinação da carga suspensa transportada pela pluma em função da ausência de dados como velocidade da corrente nessa zona e determinação da seção transversal.

Tabela 9.9. Concentração de sólidos suspensos no interior e fora das plumas de sedimentos em suspensão nas margem esquerda e direita da seção transversal na estação E1 (desembocadura).

Mês	1	2	3	4
	(mg/l)			
out-05	140,0	4,0	*	*
nov-05	87,0	8,0	*	*
dez-05	52,0	17,0	5,0	8,0
fev-06	175,0	14,0	3,0	27,0
mar-06	8,0	3,0	2,0	11,0
abr-06	12,0	3,0	2,0	4,0
mai-06	288,0	6,0	2,0	171,0
jun-06	260,0	6,0	12,0	165,0
ago-06	4,0	4,0	*	*

Legenda: (1) Pluma na margem esquerda, (2) Fora da pluma da margem esquerda, (3) Fora da pluma da margem direita e (4) Pluma da margem direita. * Ausência de dados.

Tomando como base a concentração de sedimentos suspensos de 6,11 mg/l na E1, durante o inverno, que é igual à concentração em maio de 2006 na pluma (6,0 mg/l), podemos estimar a carga de sedimentos transportados em suspensão pela pluma. Considerando a situação das marés de vazante de quadratura, durante o inverno (condição de menor velocidade da corrente), que transportaram na E1 uma carga de 756,32 m³/mês (Tabela 9.3), pode-se estimar a carga exportada pela pluma de vazante é 48 vezes superior, na ordem de 36.303,36 m³/mês.

Os canais de despesca exportam para o rio Pisa Sal uma carga total na ordem de 128,75 m³/mês (E5) e 5,75 m³/mês (E6), indicando ocorrer em outros trechos dos canais deposição marginal dos sedimentos erodidos da base dos taludes, principalmente. Nas curvas dos canais, ocorrem importantes processos de deposição com formação de barras em pontais de composição, ora arenosa ora lamosa.

Confrontando as informações sobre o volume erodido e a carga total (Qt) transportada no canal do Pisa Sal e nos canais de despesca (CDs) (Capítulo 8 - Caracterização da Erosão no Sistema Pisa Sal), pode-se estabelecer a relação volume erodido-carga total exportada.

O volume erodido de 3.996,55 m³/ano nos perfis P7, P8 e P12, que se situam à montante da E1, é, praticamente, todo exportado, uma vez que sua carga transportada é de 3.595,38 m³/ano. Por outro lado, o volume erodido nos perfis P9 a P11, localizados à montante da E3, é de 5.779,35 m³/ano, portanto, 2,4 vezes maior que a carga transportada de 2.426,91 m³/ano na referida estação, indicando que está ocorrendo deposição de sedimentos à montante. Isso é evidenciado pela formação de barras em pontais no canal Volta do Sertão e pela redução da sua profundidade.

Com respeito ao volume erodido e à carga total transportada nos CDs durante os quatro meses de inverno, observa-se que o volume erodido de 517,00 m³ e a carga total transportada de 515,00 m³ no CD1 são iguais, indicando equilíbrio sedimentar do canal. Entretanto, o CD2 mostra um volume de erosão na ordem de 244,80 m³ e carga total transportada de 23,00 m³, resultando na deposição de 221,8 m³ durante o inverno, o que é registrado pela diminuição da profundidade do canal como consequência da deposição de lamas no seu centro e margens, onde se desenvolve extensa fauna de bivalves.

10 DATAÇÃO E TAXA DE SEDIMENTAÇÃO DO SISTEMA PISA SAL

Este capítulo apresenta os resultados da datação e da determinação da taxa de sedimentação (TS) dos sedimentos do sistema Pisa Sal (Figura 10.1). Para a datação absoluta dos sedimentos, foi utilizada a técnica AMS ^{14}C , enquanto, para a TS, foi utilizado o método gamaespectométrico ^{210}Pb .

Para este estudo, foram realizadas duas sondagens *vibro core* no dia 06/08/2005 e duas sondagens *push core* no dia 27/08/2005, as quais foram realizadas com objetivo de fazer parte deste trabalho, bem como do trabalho de conclusão de curso Hinrich Dibbern, bolsista do programa de intercâmbio acadêmico Brasil-Alemanha (UNIBRAL 21-04 CAPES-DAAD), entre o Programa de Pós Graduação em Geodinâmica e Geofísica/UFRN e o Institut für Geowissenschaften IFG – Christian-Albrechts-Universität, Kiel. Os dados brutos aqui utilizados constam em Dibbern (2007).

10.1 AMOSTRAGEM E PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

Será apresentada aqui a metodologia aplicada nas sondagens *vibro core* e *push core*, os procedimentos laboratoriais de análise granulométrica, preparação das amostras para datação e as técnicas de datação por ^{14}C e ^{210}Pb dos testemunhos *vibro* e *push core*.

Durante a estofa de vazante, foram realizadas, em cada banco, uma sondagem *vibro core* (VCGA) para determinação do empilhamento estratigráfico, coleta de amostras para análise granulométrica e datação ^{14}C , e uma sondagem *push-core* (TUGA) para determinação da taxa de sedimentação (TS) por ^{210}Pb . A localização das sondagens foi estabelecida pelo Sistema de Posicionamento Global (GPS) utilizando o Datum WGS 84 (24 M) (Tabela 10.1 e Figura 10.1).

Nas sondagens *vibro core*, foram utilizados tubos de PVC (6,0 m de comprimento e 0,10 m de diâmetro), que, fixados a uma braçadeira metálica conectada a um motor através de uma mangueira de borracha, que provoca vibrações no tubo, permite a sua penetração na camada de sedimentos.

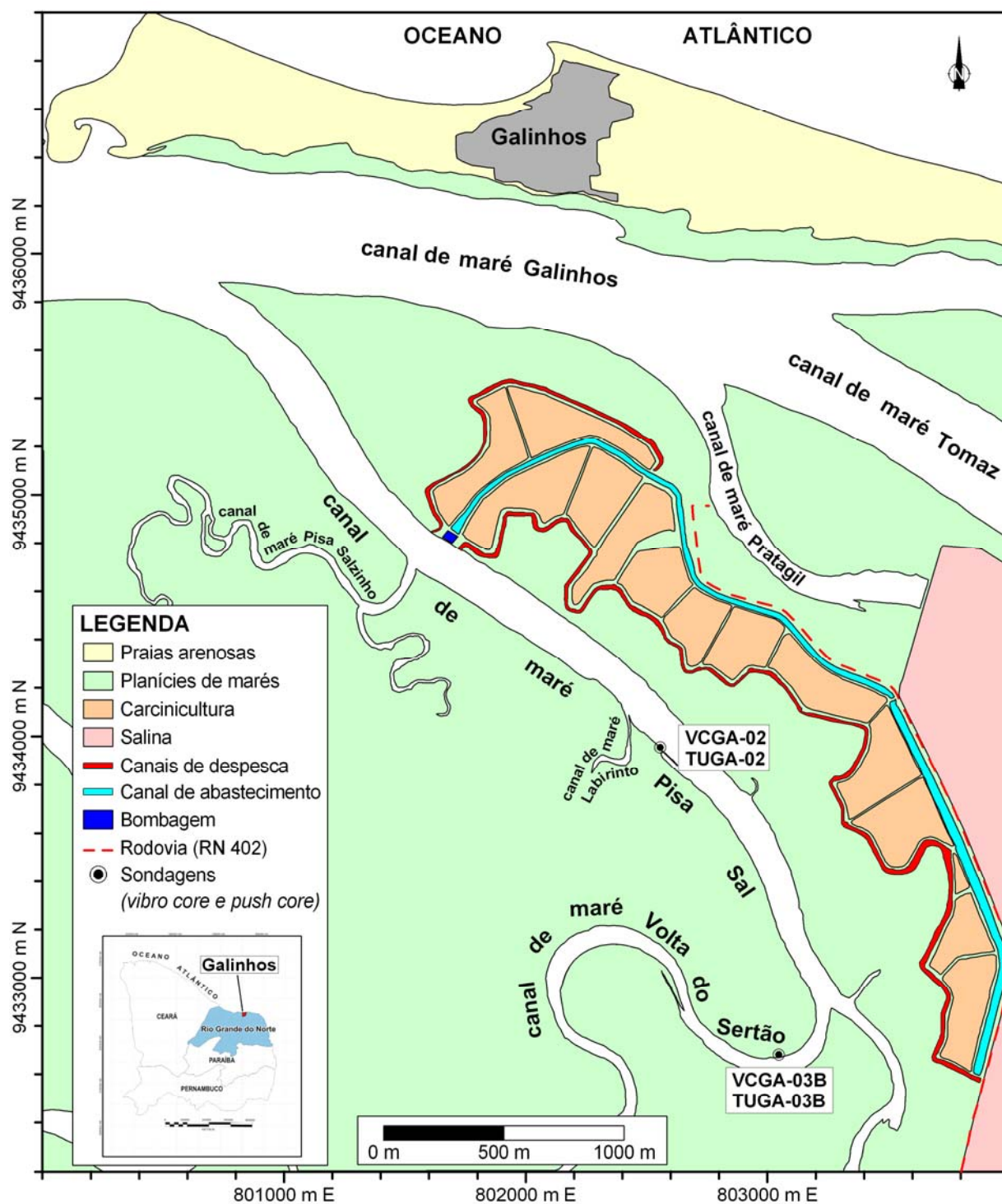


Figura 10.1. Mapa de localização das sondagens *vibro core* (VCGA) e *push core* (TUGA) no sistema Pisa Sal, Galinhos-RN.

Tabela 10.1. Características das sondagens *vibro core* (VCGA) e *push core* (TUGA) no sistema Pisa Sal, Galinhos-RN.

Sondagem	Data	Coordenadas UTM		Prof. m
		m E	m N	
VCGA-02*	06.08.05	802556	9433956	1,47
TUGA-02**				0,88
VCGA-03B	06.08.05	803047	9432682	1,26
TUGA-03B				0,93

* VC (*vibro core*), GA (Galinhos)

**TU (*push core*), GA (Galinhos)

Nas sondagens *push core*, foram utilizados tubos de PVC de 3,0 m de comprimento e 0,05 m de diâmetro, os quais foram pressionados, lenta e verticalmente, na camada sedimentar até ocorrer o bloqueio da penetração.

Os testemunhos *vibro core* foram seccionados a cada 33 cm e separados em três fatias, da seguinte forma: uma fatia extrema foi utilizada para avaliação sedimentar e estrutural preliminar, bem como para coleta de amostras para peneiramento; a outra fatia externa foi arquivada para estudos futuros e a fatia intermediária (espessura máxima de 2 cm) foi radiografada (55 kV). Foi amostrado um total de sete seções dos testemunhos nas profundidades onde ocorrem areia muito grossa a fina, a saber: VCGA-02 (66 a 72 cm, 86 a 92 cm, 106 a 112 cm e 127 a 133 cm) e VCGA-03B (70 a 75 cm, 90 a 95 cm e 115 a 121 cm).

Essas amostras foram secadas 60 °C e, posteriormente, foram atacadas com H₂O₂ (10 %) para destruição da parte orgânica e determinação do seu teor por diferença de peso. Em seguida, 100 gramas da amostra foi peneirada em sistema vibratório na seguinte bateria de peneiras: 1,7 mm; 1,4 mm; 1,18 mm; 1,0 mm; 0,85 mm; 0,71 mm; 0,6 mm; 0,5 mm; 0,425 mm; 0,355 mm; 0,3 mm; 0,25 mm; 0,212 mm; 0,18 mm; 0,15 mm; 0,125 mm; 0,106 mm; 0,09 mm; 0,075 mm; 0,063 mm e 0,053 mm.

Nas seções dos testemunhos VCGA-02 e VCGA-03B, em que ocorrem sedimentos na faixa entre 150 a 0,5 µm (areia média e argila), a separação granulométrica foi realizada com 1,5 a 2,0 g de material utilizando granulômetro a laser (CIS) no FTZ Centro de Tecnologia e Pesquisa Costa Ocidental-FTZ em Büsum. As amostras foram atacadas com H₂O₂ (10 %) para posterior determinação do seu teor.

A classificação granulométrica nas amostras foi realizada segundo Udden-Wentworth, variando de 1,0 mm (0 phi) a 0,002 mm (9 phi) em intervalos de 1 phi. Posteriormente, foram calculados os parâmetros estatísticos das amostras segundo

Tucker (1991 e 1996): moda, média, mediana, desvio padrão, selecionamento, curtose e assimetria.

Fragmentos de madeira e uma concha de bivalve foram amostrados, respectivamente, nos testemunhos VCGA-02 (142 a 147 cm) e VCGA-03B (121 a 126 cm) e utilizados para datação AMS ^{14}C . Os fragmentos de madeira foram extraídos a 60°C com uma solução a 1% de HCl e uma solução a 1% de NaOH. A seguir, foi feita outra extração com solução de HCl a 1%. A combustão foi efetuada a 900 °C em uma ampola de quartzo, preenchida com CuO e lã de prata. O CO_2 obtido foi reduzido a grafite, a uma temperatura de 600 °C, sob atuação de H_2 sobre um catalisador de ferro. Em seguida, a mistura de ferro e grafite foi prensada e preparada para a medição no AMS (Dibbern, 2007). Enquanto isso, a concha foi tratada com uma solução de H_2O_2 (30 %) em um banho de ultrassom, para eliminar partículas orgânicas, restos de carbonatos e resquícios de poeira. A hidrólise para CO_2 foi efetuada a 90 °C com ácido fosfórico.

Para a determinação das idades ^{14}C , foi utilizada a técnica AMS (Espectrometria de Massa com Aceleradores), no Laboratório de Leibniz-Kiel, a partir de um sistema AMS 3MV HVEE Tandetron 4130 AMS. O referido sistema apresenta um background de 0,3 % (Dibbern, 2007). As idades radiocarbono não foram corrigidas segundo o “efeito reservatório” oceânico padrão.

Os testemunhos *push core* TUGA-02 e TUGA-03B foram totalmente seccionados em discos de 2,0 cm de espessura que formaram amostras para datação por ^{210}Pb . A TS foi determinada a partir da análise dessas amostras até à profundidade de 80,0 cm em intervalos que variaram de 2,0 a 4,0 cm. A amostra superficial (0,0 a 2,0 cm) foi desprezada devido a prováveis processos de mistura de sedimentos e bioturbação. As idades gamaespectrométricas foram determinadas no International Atomic Energy Agency- IAEA em Mônaco. Os Apêndices 10.1 e 10.2 apresentam respectivamente os dados da atividade do ^{210}Pb e a taxa de sedimentação (TS) dos testemunhos TUGA-02 e TUGA-03B.

1.2 MÉTODO AMS ^{14}C

A datação por radiocarbono em materiais biogênicos tais como conchas e restos de madeira é uma importante ferramenta para determinar idades dos sedimentos e estabelecer a evolução espaço-temporal em ambientes costeiros, seja na

linha de costa seja em ambientes estuarinos e lagunares, principalmente no que se refere à variação do nível do mar e/ou no entendimento do empilhamento estratigráfico. Por outro lado, idades radiocarbono em madeira e conchas não devem ser comparadas entre si, devido as suas características distintas.

O método de datação por ^{14}C utiliza o decaimento radioativo do isótopo de $^{14}\text{C}_6$ (instável) que emite, durante esse processo, radiações tipo β e gera núcleos de $^{14}\text{N}_7$ (estável).

O radiocarbono (^{14}C) é produzido nas camadas superiores da atmosfera pelo bombardeamento do ^{14}N por raios cósmicos que é, progressivamente, misturado à atmosfera na forma de $^{14}\text{CO}_2$, sendo, posteriormente, absorvido pelos oceanos e pela biosfera. Todo organismo vivo incorpora uma certa quantidade de ^{14}C durante sua vida, a qual permanecerá em equilíbrio dinâmico com os reservatórios de carbono, até o momento no qual o organismo morre. Com a morte do organismo, a quantidade de ^{14}C não será reabastecida, decrescendo, sistematicamente ao longo do tempo, seguindo a lei de decaimento radioativo com uma meia-vida de 5.730 anos. Desta forma, é possível determinar o período de tempo entre o falecimento do organismo e o momento de medida, a partir da determinação da quantidade de ^{14}C remanescente na amostra que, originalmente, possuía carbono. A técnica de datação por radiocarbono é limitada pela incapacidade de medir reduzidíssimas quantidades de ^{14}C e torna-se mais difícil no decorrer de sete meias vidas, tempo em que, aproximadamente, somente 1,0 % do ^{14}C original ainda se encontra presente, permitindo determinar-se uma idade aproximada de 40.000 anos AP, indicativo do limite de detecção do método (Bird *et al.*, 2004).

A determinação da idade convencional de carbono foi realizada segundo Stuiver *et al.* (1998), que é definida em relação a sua concentração isotópica C e à concentração isotópica de uma amostra padrão do ano de 1950, $C_{(1950)}$, que representa a concentração isotópica hipotética da atmosfera para este ano (Goodwin, 1962), ambas normalizadas para $\delta^{13}\text{C} = -25\text{‰}$ que representa o valor médio para a madeira terrestre (Stuiver e Polach, 1977), foi utilizada a técnica AMS (Espectrometria de Massa com Aceleradores).

O espectrômetro AMS é um aparelho que mede a massa de um átomo ou molécula, ou seja, a quantidade de ^{14}C é determinada diretamente pela sua massa. Na técnica AMS, os átomos da amostra são, primeiramente, ionizados através do bombeamento de íons césio. Os átomos aceitam uma carga negativa, tornando-se

assim ânions que são separados no analisador de acordo com sua massa. As peças são aceleradas por uma DDP e desviadas em um campo magnético, com intensidade diferente, de acordo com sua massa, sendo, em seguida, capturados por captadores de íons, registrados como impulsos elétricos e encaminhados para uma estação calculadora. Assim, é determinada a quantidade dos isótopos ^{12}C , ^{13}C e ^{14}C . Com base na comparação dos seus teores com os padrões de medição de CO_2 (ácido oxálico II) e amostras em branco, é possível determinar a concentração de ^{14}C nas amostras e determinar suas idades (Dibbern, 2007).

As idades radiocarbono foram convertidas para idades do nosso calendário (idades calibradas) através da curva de calibração IntCal04.14C dos últimos 12.000 anos AP produzida pelo programa CALIB, versão 5.1 beta (Stuiver *et al.*, 1998), com grau de confiabilidade (Sigma 1) de 68,3 %. A calibração é baseada na comparação de idades calculadas por dendrocronologia (anéis de crescimento de sequóias e carvalhos com até 10 mil anos AP) e suas respectivas idades radiocarbono.

1.3 MÉTODO GAMA-ESPECTOMÉTRICO ^{210}Pb

A datação de sedimentos por ^{210}Pb tem sido amplamente utilizada para reconstruir as mudanças ocorridas no passado em diferentes ambientes provocadas por poluição ambiental, tais como: estuarino (Benoit *et al.*, 1999; Chen *et al.*, 2001; Saito *et al.*, 2001; Dellapenna *et al.*, 2003), lagunar (Ciavola, *et al.*, 2002;; Miguel *et al.*, 2003; Arnaud-Fassetta *et al.*, 2006), lacustre (Vital 1989; Camarero *et al.*, 1998; Steiner *et al.*, 2000; Harris *et al.*, 2001) e marinho (Othman *et al.*, 2000).

Um dos mais importantes métodos de estimativa da TS em uma escala temporal de 100 a 150 anos é o método gamaespectométrico ^{210}Pb . O isótopo instável ^{210}Pb apresenta meia-vida de 22,3 anos (Goldberg, 1963 e Oldfield & Appleby, 1984). O ^{210}Pb é um produto da série de decomposição radioativa do ^{238}U . A figura 10.2 apresenta a série radioativa do ^{238}U , setor do ^{226}Ra ao ^{210}Pb e suas respectivas meias-vidas.

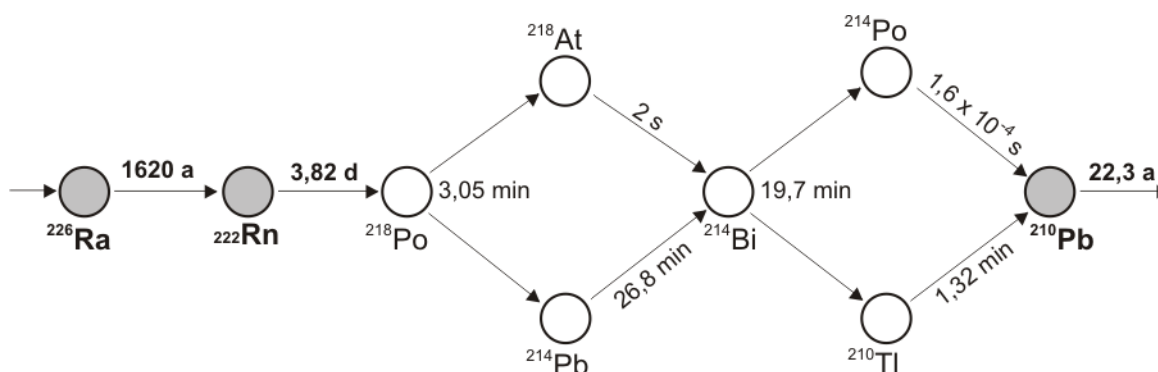


Figura 10.2. Série radioativa do ^{238}U , setor do ^{226}Ra ao ^{210}Pb e suas respectivas meias-vidas.

A desintegração espontânea do isótopo intermediário ^{226}Ra proveniente da atmosfera (aporte constante) e incorporado aos sedimentos, libera o gás inerte ^{222}Rn que decai para ^{210}Pb , sendo denominado de ^{210}Pb suportado e considerado em equilíbrio radioativo com o ^{226}Ra . Entretanto, podem ocorrer outras fontes de ^{210}Pb que venham a quebrar esse equilíbrio, sendo denominado de ^{210}Pb excesso ou ^{210}Pb não suportado, a saber:

a) Partículas radioativas atmosféricas diretas. Parte do ^{222}Rn formado pela desintegração do ^{226}Ra pode escapar através dos poros dos sedimentos e atingir a atmosfera, onde decai e libera ^{210}Pb e pode chegar novamente aos sedimentos.

b) Partículas radioativas atmosféricas indiretas. O ^{210}Pb atmosférico que permaneceu no lençol de água e somente depois de muito tempo foi carregado junto com o material erodido para um corpo aquático.

c) Desintegração do ^{222}Rn na massa d'água. Parte do ^{222}Rn que chega a um corpo aquático é perdida por difusão através da superfície do lago e parte decai para ^{210}Pb na própria água.

Os radionuclídeos usados como traçadores geocronológicos podem ser transportados para a coluna de sedimentos pelo processo de mistura provocado pela atividade dos organismos bentônicos que bioturbam os sedimentos vertical e lateralmente e/ou por ação das correntes próximas ao fundo que ressuspendem e transportam os sedimentos depositados (Binford et al., 1986). O efeito desses mecanismos causa um fluxo líquido dos radionuclídeos de uma região mais rica para outra mais pobre, ou seja, provoca um enriquecimento de radionuclídeos diretamente proporcional a profundidade. Segundo Goldberg e Koidere (1962) o deslocamento de traçadores no interior dos sedimentos ocorre por processos de difusão vertical

(unidirecional). Portanto, neste trabalho foi desconsiderado os 2,0 cm superiores dos testemunhos.

Na datação por ^{210}Pb , somente é considerada a atividade radioativa do componente em excesso/não suportado, uma vez que esta decai, exponencialmente, com o tempo, conforme a sua vida média. A determinação da atividade do ^{210}Pb não suportado é determinada pela seguinte relação: Atividade. ^{210}Pb não suportado = Atividade ^{210}Pb total - Atividade ^{210}Pb suportado.

A aplicação do ^{210}Pb como traçador em geocronologia sedimentar deve considerar que a deposição anual do excesso de ^{210}Pb pela atmosfera é relativamente constante (Rangarajan et al., 1986). Segundo Robbins e Edgington (1975), o uso do referido método de datação requer assumir as seguintes condições: o fluxo do ^{210}Pb não suportado para a interface água-sedimento é constante, a TS é constante em todo intervalo e não ocorre migração pós-deposicional do radionuclídeo no interior do sedimento.

O cálculo da idade das amostras e das taxas de deposição, segundo Appleby e Oldfield (1978), podem ser realizadas, segundo dois modelos, a saber: o modelo CIC (*Constant Initial Concentration/Concentração Inicial Constante*) que apresenta bons resultados em áreas com taxas de deposição constante e o modelo CRS (*Constant Rate Supply/Taxa de Suprimento Constante*), que assume um aporte de ^{210}Pb constante e TS variável. Neste trabalho, foi aplicado o método CRS, uma vez que as correntes de fundo são relativamente elevadas e as taxas de deposição são variáveis.

O inventário ou atividade integrada (I_0) do ^{210}Pb não suportado foi calculado pela equação 10.1:

$$I_0 = \sum (^{210}\text{Pb}_{\text{n\~{a}o suportado}} \times \text{DBD} \times x) \dots\dots\dots 10.1$$

onde: DBD (*dry bulk density*) é a densidade a seco e x é a espessura da camada de sedimento que contém o ^{210}Pb não suportado.

A determinação das idades dos sedimentos (t) foi calculada segundo Allen et al. (1993) conforme a equação 10.2:

$$t = 1/\lambda \times \ln(A_{(0)} / A) \dots\dots\dots 10.2$$

onde: λ é a constante de desintegração radioativa do ^{210}Pb (0,0311 ano), $A_{(0)}$ é a atividade total do ^{210}Pb não suportado ($\text{dpm}/\text{cm}^2 = I_{(0)}$) e A é a atividade residual acumulada do ^{210}Pb não suportado ($\text{dpm}/\text{cm}^2 = I$).

A taxa de sedimentação para cada seção do testemunho foi determinada, dividindo-se a espessura de sedimento dos horizontes (z) pela diferença de idade (Δt), segundo o modelo CRS (Allen *et al.*, 1993).

10.4 IDADE DOS SEDIMENTOS E TAXA DE SEDIMENTAÇÃO

Os resultados obtidos na datação AMS ^{14}C e datação gama-espectométrica ^{210}Pb das amostras dos testemunhos de *vibro core* (VCGA-02 e VCGA-03B) e *push core* (TUGA-02 e TUGA-03B), respectivamente, permitem tecer considerações sobre a idade absoluta da base do testemunho e estabelecer a TS anual para a camada superficial de sedimentos (70 cm superiores) do sistema Pisa Sal, as quais serão apresentadas a seguir.

Os testemunhos foram coletados no banco lamoso, que ocorre no encontro do canal Labirinto e o canal Pisa Sal (VCGA-02 e TUGA-02), e no depósito de barra de pontal no meandro do canal Volta do Sertão (VCGA-03B e TUGA-03B).

10.4.1 Idade dos Sedimentos

Para a determinação das idades radiocarbono convencional (t) dos sedimentos, foram utilizadas amostras de fragmentos de madeira (VCGA-02) e uma concha de bivalve (VCGA-03B) coletadas, respectivamente, nas profundidades 142 a 147 cm e 121 a 126 cm. Essas idades não podem ser comparadas entre si, pois são constituídas por diferentes materiais.

Para a determinação da idade calibrada, foi utilizada a curva de calibração IntCal04.14C, segundo Stuiver *et al.* (1998) que converte idades radiocarbono em idade calendário. As idades radiocarbono convencional obtidas a partir do método AMS ^{14}C para os testemunhos são 1.676 ± 22 anos AP (VCGA-02) e 340 ± 25 anos AP (VCGA-03B), as quais constituem dados de entrada para a construção da curva de calibração.

A curva de calibração para a base do testemunho VCGA-02 (canal Pisa Sal) indica a idade de 1.562 anos cal AP (Figura 10.3A). Por outro lado, no testemunho

VCGA-03B (canal Volta do Sertão) três possíveis idades são indicadas: 332, 372 e 432 anos cal AP (Figura 10.3B). A tabela 10.2 mostra os parâmetros relativos à amostragem, os resultados AMS e as idades calibradas.

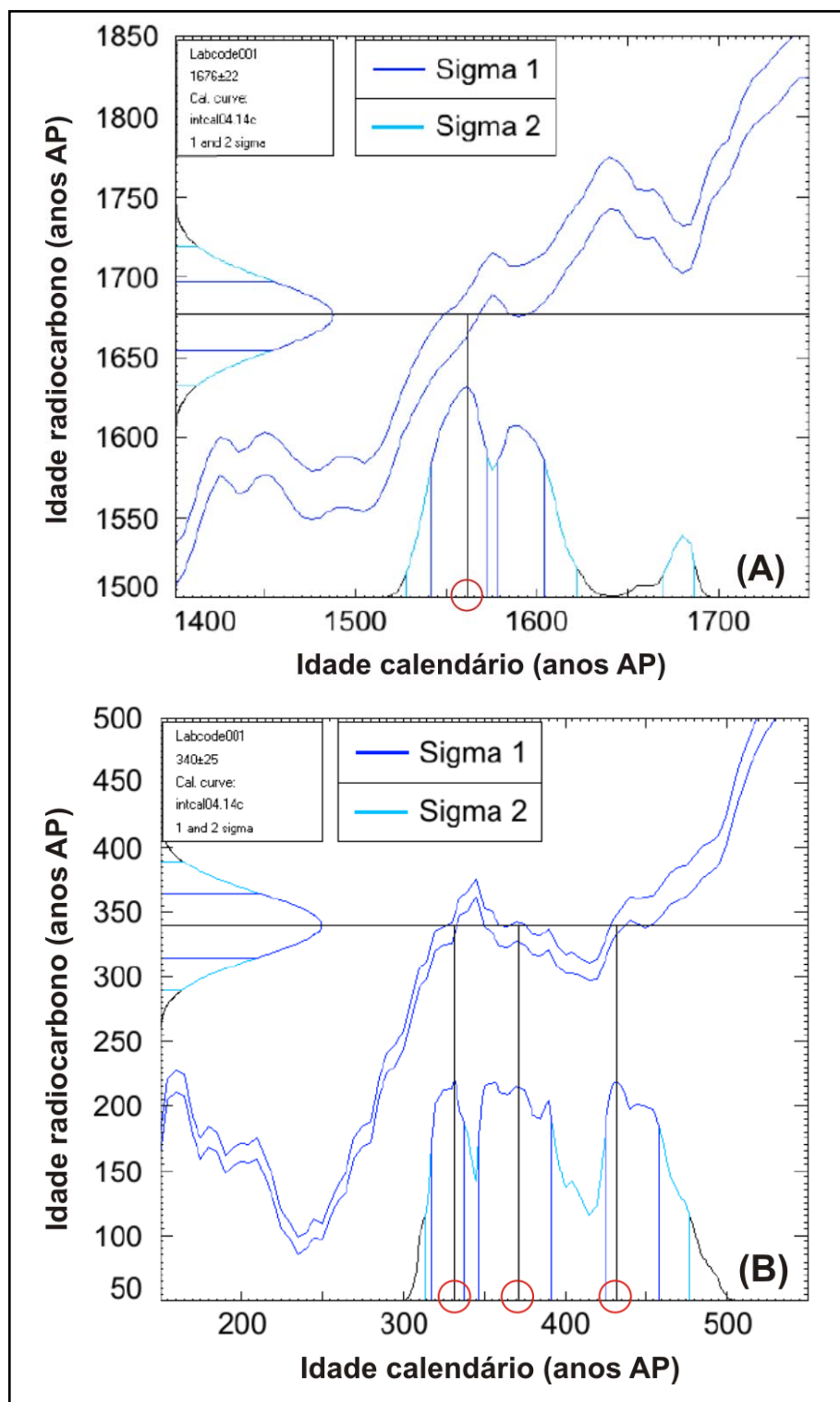


Figura 10.3. Curvas de calibração dos testemunhos *vibro core* VCGA-02 (A) e VCGA-03B (B) no sistema Pisa Sal segundo Stuvier *et al* (1998) indicando as idades calibradas (círculos vermelhos no eixo x) (adaptado de Dibbern, 2007).

Tabela 10.2. Idades AMS ^{14}C das amostras *vibro core* VCGA-02 e VCGA-03B no sistema Pisa Sal segundo Stuvier *et al* (1998) (adaptado de Dibbern, 2007).

Dados	VCGA-02	VCGA-03B
Material	fragmento de madeira	concha
Comprimento	147,0 cm	126,0 cm
Prof. amostrada	142,0 - 147,0 cm	121,0 - 126,0 cm
Prof. Água	0,0 cm	0,0 cm
Fração	4,7 mg C	0,9 mg C
PCM correção	81,17 $\pm$ 0,22	95,84 $\pm$ 0,29
$\delta^{13}\text{C}$	-29,51 $\pm$ 0,17 ‰	-6,46 $\pm$ 0,10 ‰
Idade ^{14}C	1.676 anos AP	340 anos AP
Sigma-1	$\pm$ 22 anos	$\pm$ 25 anos
Idade calibrada	1.562 anos cal AP	a) 332 anos cal AP b) 372 anos cal AP c) 432 anos cal AP

10.4.2 Taxa de Sedimentação (TS)

A atividade do ^{210}Pb não suportado decai exponencialmente com a profundidade em ambos os testemunhos, entretanto no TUGA-02 esse decaimento ocorre de forma mais regular. A referida atividade é relativamente mais elevada no TUGA-02 (0,0 a 1,55 dpm/kg) do que no TUGA-03B (0,04 a 0,6 dpm/kg). As maiores atividades ocorrem entre a superfície e 25 a 30 cm de profundidade (Figuras 10.4). Os Apêndices 10.1 e 10.2 apresentam taxas de sedimentação (TS) dos testemunhos TUGA-02 e TUGA-03B.

Observa-se que os sedimentos datados são argilosos com ocorrências de conchas de bivalves e gastrópodes, fragmentos de conchas, restos de madeira e laminações de areia, silte e argila. O testemunho TUGA-02 apresenta laminações de argila e silte com matéria orgânica nos 60 cm datados (Figura 10.4A). O TUGA-03B só apresenta laminações de areia e argila a partir da profundidade de 66 cm (Figura 10.4B). Estas características influenciam na variação da atividade do ^{210}Pb não suportado ao longo do testemunho, e conseqüentemente, na quantificação da TS.

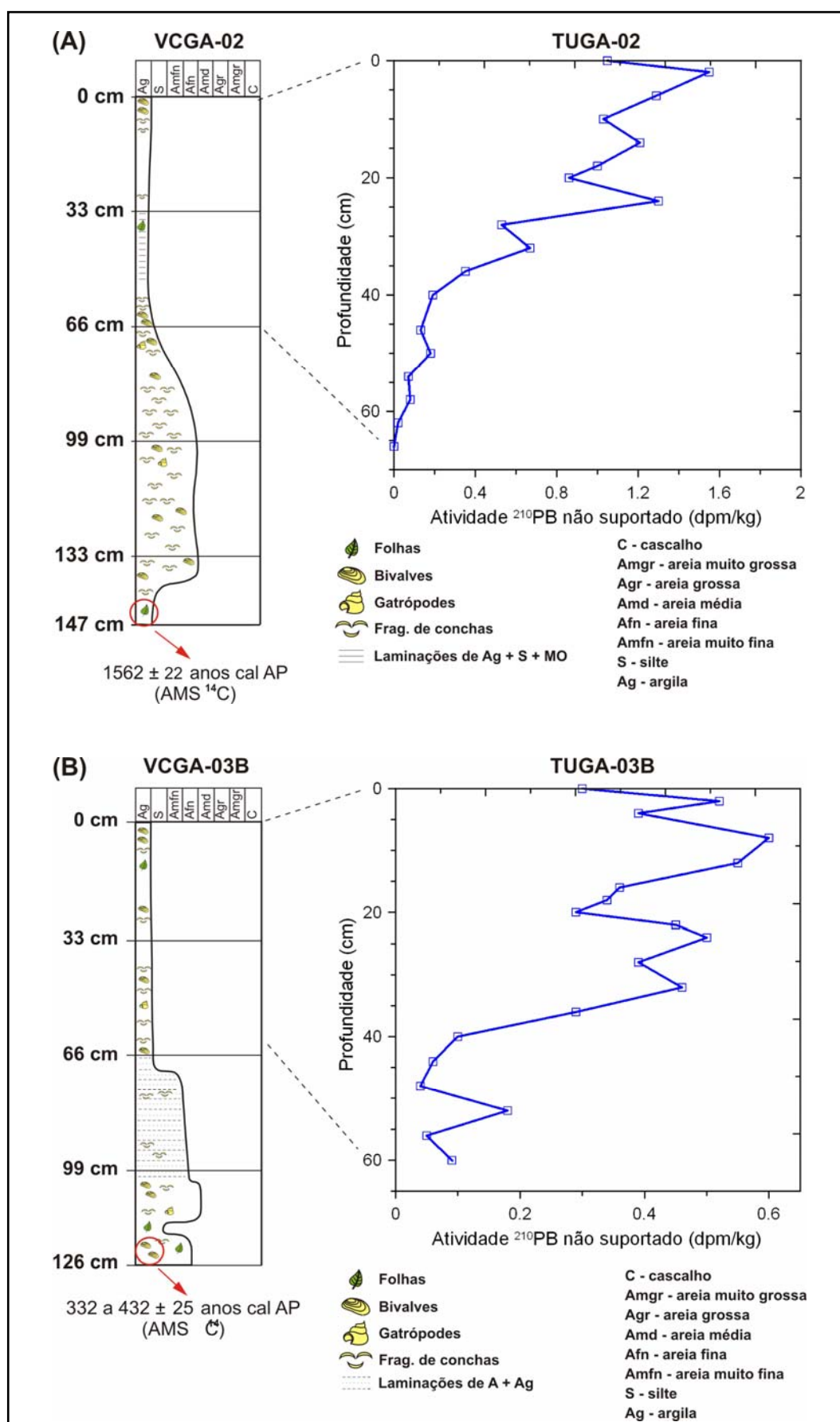


Figura 10.4. Perfil da distribuição textural do testemunho VCGA-02 e atividade ^{210}Pb não suportado em relação à profundidade no testemunho TUGA-02 (A) e perfil da distribuição textural do testemunho VCGA-03B e atividade ^{210}Pb não suportado em relação à profundidade no testemunho TUGA-03B (B).

As idades determinadas para a base dos testemunhos TUGA-02 e TUGA-03B são 139,98 anos e 120,94 anos, respectivamente. O paralelismo das curvas indica uma homogeneidade nas idades dos testemunhos (Figura 10.5).

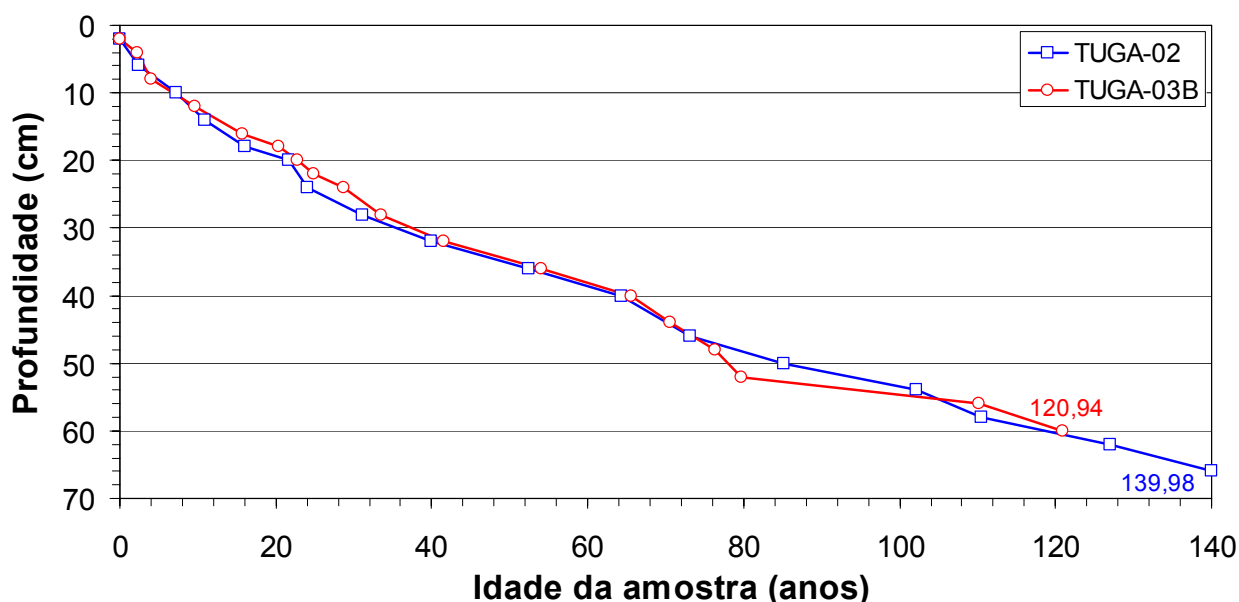


Figura 10.5. Idade das amostras dos testemunhos TUGA-02 e TUGA-03B em relação à profundidade. Os valores em vermelho e azul representam as idades da base dos testemunhos.

As taxas de sedimentação (TS) para os testemunhos TUGA-02 e TUGA-03B, desconsiderando os dois primeiros centímetros da superfície (0,0 a 2,0 cm), variam de 0,24 a 1,70 cm/ano e 0,13 a 2,21 cm/ano, respectivamente (Figura 10.6). Somente o TUGA-03 apresentou uma taxa superior a 2,0 cm/ano. Taxas entre 1,0 e 2,0 cm/ano são mais frequentes TUGA-02 até à profundidade de 24 cm e apresentam-se intercaladas por seções com taxas menores, enquanto, no TUGA-02B, ocorrem somente na profundidade de 52 cm. As maiores taxas nos dois testemunhos estão restritas à profundidade de 10 cm (Figura 10.6).

A taxa de sedimentação média (TSM) para os últimos 140 anos foi determinada pela relação entre a profundidade total datada e a idade estabelecida para a base dos testemunhos ($TDm = z / t$), que para o TUGA-02 ($TDm = z_{66} / t_{139,98}$) é igual a 0,47 cm/ano e para o TUGA-03B ($TDm = z_{60} / t_{120,94}$) é igual a 0,50 cm/ano.

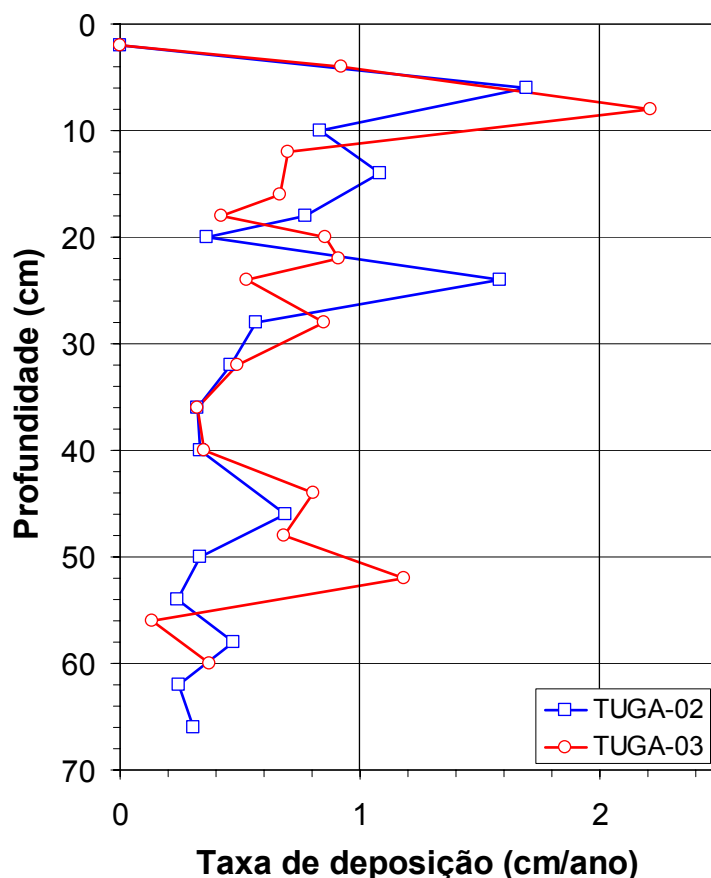


Figura 10.6. Taxa de sedimentação (TS) dos testemunhos TUGA-02 e TUGA-03B em relação à profundidade.

10.5 DISCUSSÕES

Segundo Dibbern (2007), os sedimentos datados dos canais Pisa Sal (VCGA-02), denominado pelo autor de Rio Catanduba, e Volta do Sertão (VCGA-03B) são classificados como depósitos de barras em pontal de canais de marés. Caldas (2002) descreve a porção superior dos testemunhos vibro core VCGAL-7 e VCGAL-8 (0,84 e 0,98 cm, respectivamente) localizados na desembocadura do sistema Pisa Sal também como depósitos de barra de pontal de canais de marés (Figura 10.7, VCGAL-7 e VCGAL-8, letra D), enquanto a unidade basal descreve como depósitos de planície de maré (Figura 10.7, VCGAL-7 e VCGAL-8, letra A).

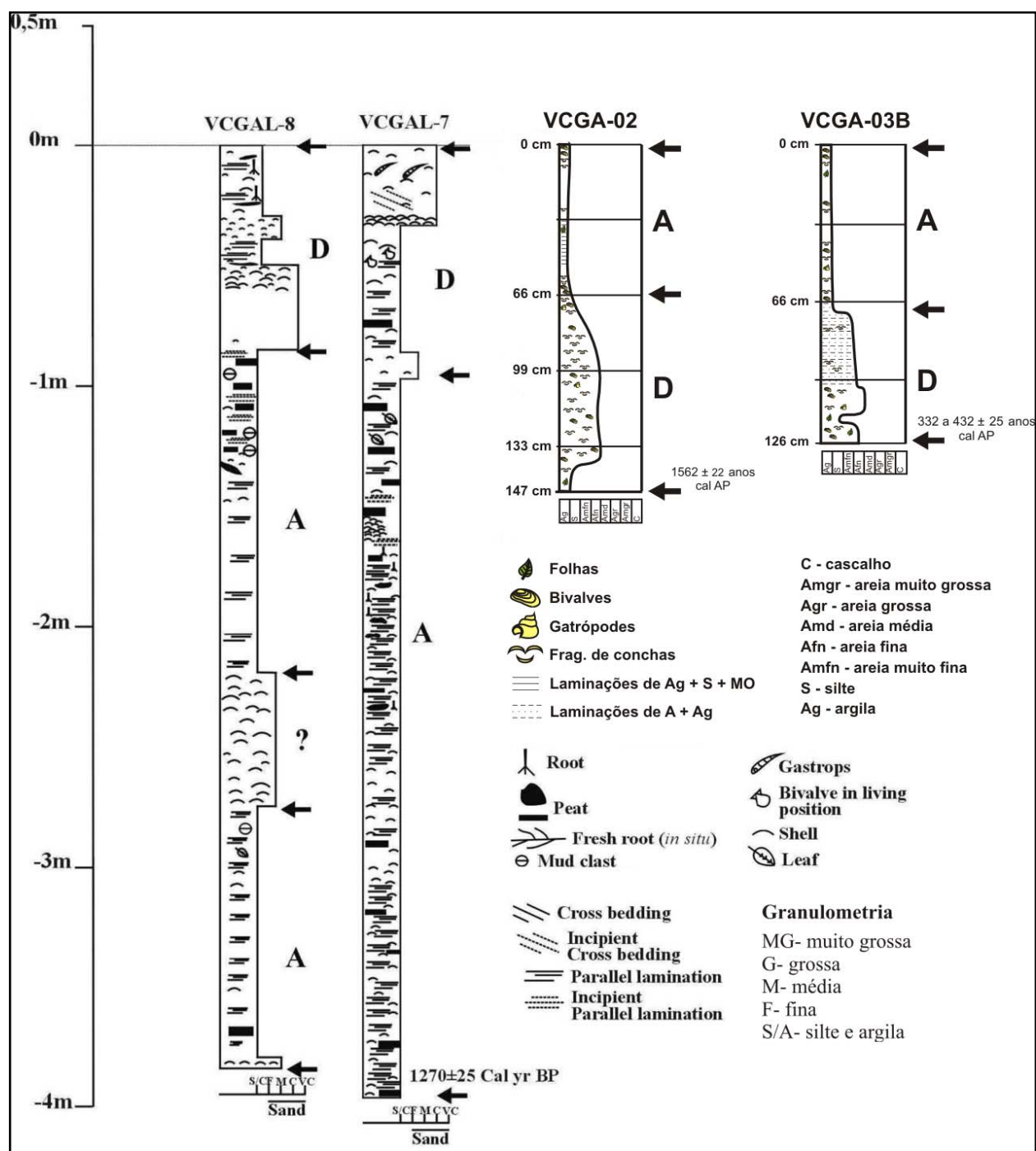


Figura 10.7. Fácies sedimentares (letras A e D), granulometria, estrutura sedimentares e idades AMS ^{14}C segundo este trabalho (VCGA-02 e VCGA-03B) e segundo Caldas (2002) (VCGAL-7 e VCGAL-8). Fácies: A= planície de maré, D= barra de pontal de canal de maré.

Os testemunhos VCGA-02 e VCGA-03B mostram seqüência estratigráfica idênticas, onde se destaca uma seqüência de base constituída por areia quartzosa fina maciça (VCGA-02) ou com laminações intercaladas de areia e argila (VCGA-03B), apresentando importante conteúdo de moluscos (bivalves e gastrópodes), fragmentos de conchas e restos de madeira (raízes e folhas), espessura variando de 0,66 a 0,81

m, classificados como depósitos de barra de pontal de canal de maré. Acima destes depósitos, ocorrem sedimentos argilosos e/ou laminações intercaladas de argila, silte e matéria, além de moluscos (bivalves e gastrópodes), fragmentos de conchas e restos de madeira (raízes e folhas) com espessura variando de 0,66 a 0,70 cm, classificados como depósitos de planície de maré.

Os dados sedimentológicos, estruturais e de campo indicam que estes depósitos foram formados em ambiente de intermaré com acreção vertical e migração lateral em direção ao centro do canal principal (Figura 10.8), onde a seqüência basal arenosa formada em sub-ambiente de barras em pontais de canais de marés é sobreposta por uma seqüência de intercalações de argila e silte de planície de intermaré. Esta seqüência superior não é registrada nos testemunhos de Caldas (2002) devido à grande carga de sedimentos arenosos atuais que são transportados pelas fortes correntes de vazante e depositados na foz do complexo estuarino lagunar Galinhos-Guamaré.



Figura 10.8. Bancos lamosos em ambiente de intermaré na margem esquerda do canal do Pisa Sal onde foi coletado o testemunho VCGA-02 (A) e VCGA-03B (B) (Imagem Ikonos, 2003). A letra d identifica a zona de ocorrência de dunas 2D. O ponto branco é a localização do testemunho.

Datação ^{14}C realizada por Caldas (2002) em restos de madeira posicionados aproximadamente a -4,0 m de profundidade em depósitos de planícies de marés na desembocadura do sistema Pisa Sal (VCGAL-7) mostram idades de 1270 ± 25 anos cal AP. Por sua vez, a idade calibrada em restos de madeira para os sedimentos de barra de pontal no canal Pisa Sal localizada a uma profundidade de -1,47 cm é de 1562 ± 22 anos cal AP (VCGA-02) (Figura 10.7), enquanto no depósito de barra de pontal do

canal Volta do Sertão a idade em concha na profundidade de -1,26 m é de $332-432 \pm 25$ anos cal AP.

Desta forma, a idade de 1562 ± 22 anos cal AP deve estar relacionada às seguintes possibilidades: (1) é a idade real dos sedimentos com ausência da seqüência inferior de no mínimo 2,0 m de espessura; (2) é uma idade real com retrabalhamento e transporte do material datado; ou (3) é uma idade falsa. Por outro lado, a idade de $332-432 \pm 25$ anos cal AP apresenta-se como a idade mínima mais provável para os sedimentos do sistema Pisa Sal, uma vez que mostra correlação temporal e vertical com as idades apresentadas por Caldas (2202) e com as obtidas por ^{210}Pb (122,66 a 138 anos cal AP).

A variação das taxas de sedimentação do canal Pisa Sal e Volta do Sertão ao longo do tempo são aproximadamente iguais, com taxas médias respectivas de 0,47 e 0,50 cm/ano, indicando que nos últimos 140 anos as condições climáticas e hidrodinâmica da região mantêm-se inalteradas até os dias atuais. Entretanto, a energia desses canais há mais de 140 anos era superior, possibilitando o transporte e deposição de areia fina (Fácies D).

O trabalho de Santos *et al.* (2008) que revisa os resultados da aplicação dos métodos ^{14}C , ^{137}CS e ^{210}PB para determinação da taxa de sedimentação segundo diversos autores em ambientes de lagoas costeiras, estuários e manguezais do Brasil, mostra TS na faixa aproximada do sistema Pisa Sal, a saber: laguna de Patos (0,25-0,83 cm/ano), laguna de Jacarepaguá (0,4-2,2 cm/ano), baía de Guaratiba (0,61 cm/ano) e estuário Cananéia-Iguape (0,53-0,98 cm/ano).

Estabelecendo a relação entre a TS e a idade calendário, observa-se que o início da deposição dos sedimentos de planície de intermaré atuais nos canais do Pisa Sal e Volta do Sertão ocorreu a partir dos anos de 1868 e 1883, respectivamente. As maiores TS foram de 2,21 (TUGA-03B) e 1,70 m/ano (TUGA-02) que ocorreram nos períodos respectivos de 2002 a 2004 e 2004 a 2006. Taxas maiores que 0,5 m/ano ocorreram nos dois testemunhos nos períodos de 1926 a 1942, 1973 a 1986 e 1900 a 2006 (Figura 10.9).

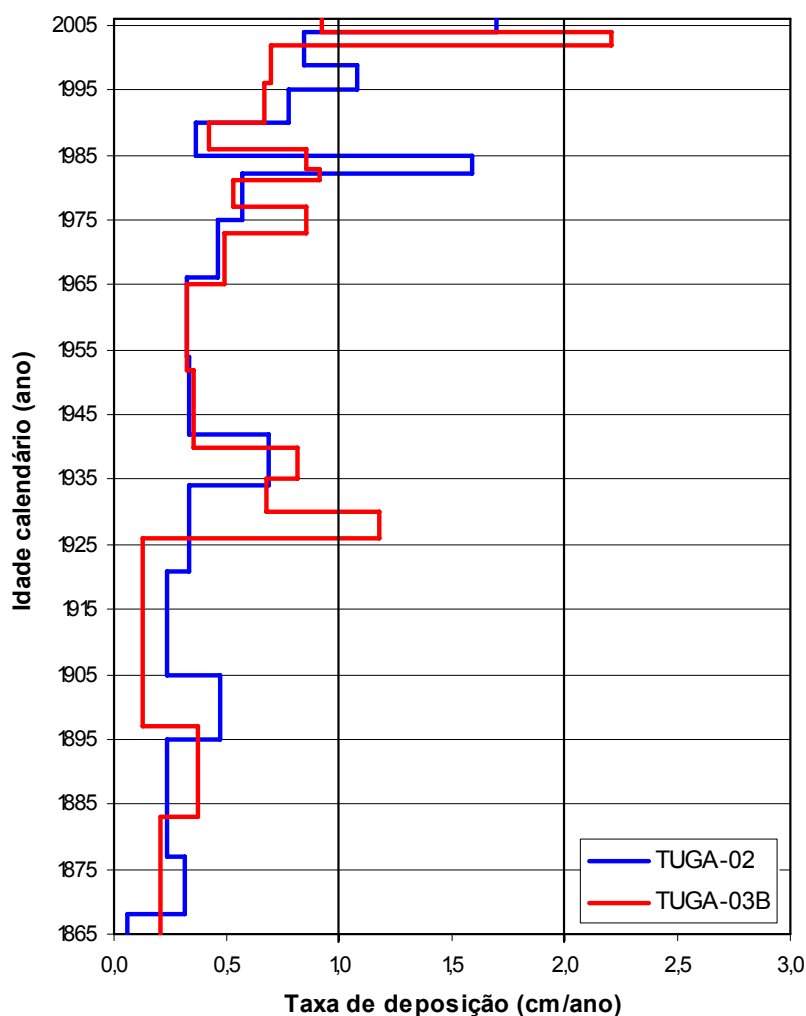


Figura 10.9. Taxa de sedimentação (TS) no período de 1868 a 2006 nos canais do Pisa Sal (TUGA-02) e Volta do Sertão (TUGA-03B).

Dados de precipitação da Estação Meteorológica da EMPARN na cidade de Guamaré-RN no período de 1962 a 2005 (Figura 10.10) mostram que, em alguns períodos de tempo, a taxa de sedimentação está relacionada com a precipitação, entretanto, em outros períodos, inclusive os mais elevados (2002 a 2006) a precipitação é inferior a 500 mm, não justificando essa alta TS. Dados de chuva da estação instalada na área de trabalho entre os anos de 2004-2006 mostram precipitações menores que as de Guamaré-RN (Figura 4.9). Por outro lado, a instalação de projetos de carcinicultura a partir do ano de 2001 e os processos erosivos desencadeados, também, são responsáveis pelo aumento da TS, com taxas superiores a 1,5 mm/ano (Figura 10.10). As alterações ambientais advindas do manejo das salinas também contribuem com a elevação da TS.

Santos *et al.* (2008) também indica o uso inadequado do solo por atividades agrícolas e urbanas em áreas de lagoas costeiras, estuários e manguezais como um dos responsáveis pelo aumento dos processos de erosão continental e conseqüente aumento das taxas de sedimentação.

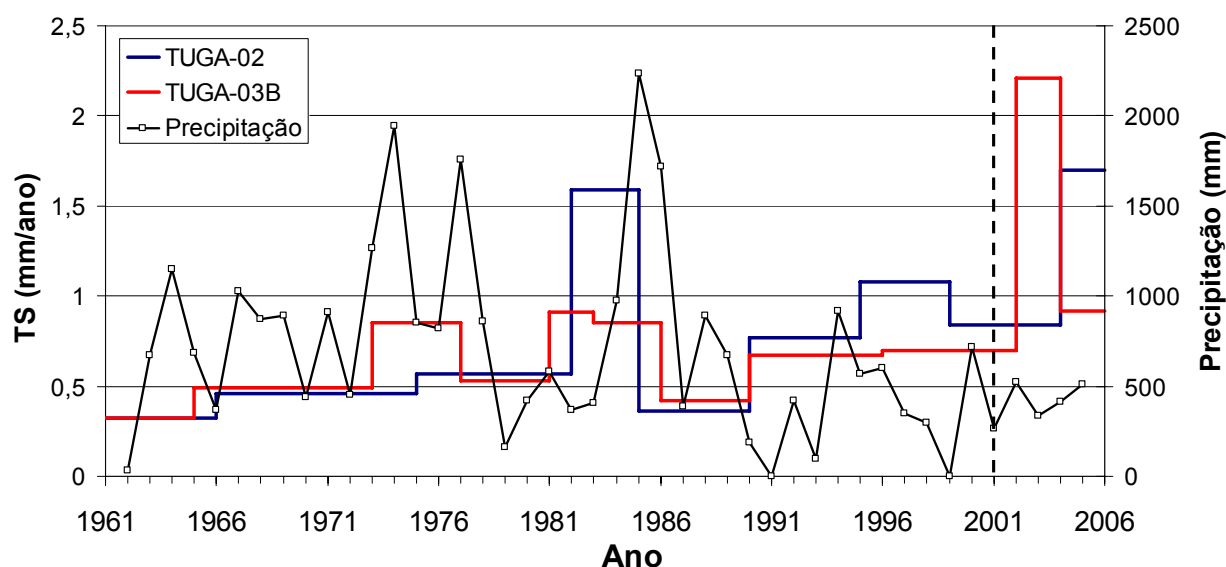


Figura 10.10. Precipitação anual (mm) no período de 1962 a 2005 na Estação Meteorológica de Guamaré/EMPARN (disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia/INMET, www.inmet.gov.br). No ano de 1962 só foi registrado o período entre agosto e dezembro, enquanto nos anos de 1991 e 1999 não houve registro. A linha tracejada preta indica o início da instalação da carcinicultura na região.

CONCLUSÕES

Os estudos realizados no sistema Pisa Sal, um conjunto de canais de marés e canais artificiais, integrantes do complexo estuarino lagunar Galinhos-Guamaré desenvolvido atrás de um sistema de antigas ilhas barreiras, em um litoral aberto, com regime de mesomaré, constituíram um banco de dados multidisciplinar que permitiu caracterizar os parâmetros meteorológicos da região, a estrutura morfológica dos canais, as formas de leito, a composição textural e faciológica, bem como caracterizar e quantificar as correntes de marés, as propriedades termohalinas, a erosão, o transporte de sedimentos e a taxa de sedimentação.

Portanto, as informações contidas neste trabalho estão relacionadas às alterações ambientais e os processos correlatos que ocorrem no sistema Pisa Sal, as quais são decorrentes de fenômenos naturais (marés, correntes, chuva, vento e ondas) e antrópicos (escavação e barramento de canais, construção de taludes em áreas de inter e supramaré, lançamento de efluentes das salinas e carcinicultura no meio aquático e destruição de mangue).

Nesse sentido, apresentaremos a seguir, as considerações finais a respeito deste estudo que, esperamos, possam subsidiar instrumentos legais que contribuam com o processo de sustentabilidade ambiental desta região.

i) Meteorologia

Os ventos que ocorrem na área apresentam velocidades médias distribuídas em dois períodos: entre os meses de março e julho (12,09 km/h) e entre os meses de agosto e fevereiro (17,72 km/h). Os ventos SE predominam ao longo do ano, podendo ocorrer ventos E associados aos ventos NE. As maiores velocidades estão relacionadas aos ventos NE e ocorrem no período de outubro a março. Os ventos SE predominantes ao longo do ano na área de ocorrência do sistema Pisa Sal são importantes na geração de ondulações de baixo comprimento e alta frequência na superfície da água que, ao atingirem as margens lamosas dos canais, provocam sua ressuspensão. A pequena amplitude de variação na direção dos ventos (SE e NE) e as velocidades relativamente altas são responsáveis pelo modelamento da zona costeira, principalmente na formação e migração de campos de dunas. Da mesma forma, estas características possibilitam a exploração do potencial eólico da região para instalação de parques de produção de energia eólica. Por outro lado, a temperatura média para o

período estudado (28,44 °C) e a pequena variação na amplitude média anual (1,23 °C), vêm contribuir para a elevação da taxa de evaporação, e conseqüentemente, provocar o aumento significativo da salinidade da água que chega a atingir 43,18 PSU.

A precipitação média na região é historicamente baixa, tendo atingido, no período deste trabalho 248,7 mm, para um volume acumulado de 746,0 mm, em que as maiores precipitações ocorreram entre março e junho. Dessa forma, que a contribuição pluvial no sistema Pisa Sal é insignificante, contribuindo através de pequena taxa de escoamento superficial e precipitação direta. A fração que infiltra é baixa devido às características lamosas das planícies de marés predominantes na área, bem como à distribuição localizada e às pequenas dimensões dos depósitos dunares. A umidade relativa média (64,61 %) mostra boa correlação com a temperatura e precipitação, com médias mensais superiores à média anual (chuvas) e médias mensais inferiores à média anual (estiagem). Deste modo, a caracterização do regime pluvial da área auxilia sobremaneira o entendimento dos processos erosivos, do transporte de sedimentos, das características hidrodinâmicas locais, da variação da salinidade da água e da classificação termohalina dos corpos aquáticos.

ii) Batimetria, Geomorfologia e Formas de Leito

A calha do canal Pisa Sal, orientada SE-NW, possui extensão de 8,0 km, largura média de 150 m, profundidade máxima de -4,23 m, perfil longitudinal bastante regular e gradiente horizontal. Nas zonas de confluência de canais (aumento da velocidade), as profundidades aumentam à jusante e bancos marginais se formam à jusante e à montante. A morfologia dos perfis transversais muda da forma em “V” à montante para a forma em “U” canal abaixo, indicando que a energia diminui canal abaixo e favorece a instalação de processos deposicionais. A soleira sedimentar, na foz do Pisa Sal, é um indicativo da predominância de deposição. Por outro lado, bancos areno-lamosos com superposição de formas de leito ocorrem associados aos canais meandantes, os quais são correlacionados ao ambiente de barra de pontal de canais de marés, formados em ambiente de intermaré por acreção vertical e migração lateral em direção ao seu centro.

O mecanismo de “molhe hidráulico de maré” ou “espigão hidráulico de maré” é o responsável pela formação dos bancos areno lamosos e canais esculpidos no leito do Pisa Sal na desembocadura dos canais de despesca (canais artificiais).

As formas de leito que ocorrem nos canais do sistema Pisa Sal são representadas por: fundo plano, marcas de ondas, dunas subaquosas transversais 2-D e 3-D de pequeno, médio e grande comprimento, superposição de formas de leito e rocha. O fundo plano ocorre nas margens dos canais associado aos sedimentos lamosos depositados por fracas correntes de marés. As dunas 2-D e 3D são assimétricas e mostram vergência canal abaixo, onde as dunas 3-D estão associadas a zonas de maior velocidade das correntes. A superposição de formas de leito, bem como as formas acima citadas, reflete a complexidade das condições hidrodinâmicas e faciológicas, tais como: variações na velocidade das correntes, assimetria da maré e granulometria dos sedimentos.

iii) Faciologia e Caracterização Textural

Os sedimentos de fundo do sistema Pisa Sal mostram as seguintes fácies texturais: areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina, areia muito fina e silte. As fácies arenosas mais grossas ocupam a calha dos canais, enquanto as fácies areia muito fina e silte ocupam as margens. Esta distribuição e a elevada relação areia-lama no centro dos canais evidenciam um transporte de alta energia na calha do canal e que favorecem a formação das dunas subaquáticas 2D e 3D. Da mesma forma, a grande variação do grau de seleção das partículas sedimentares (muito bem a muito pobremente selecionado) e da assimetria (muito negativa a muito positiva) indicam heterogeneidade na velocidade das correntes de vazante e enchente.

As fácies sedimentares mapeadas no sistema Pisa Sal são representadas pelos sedimentos arenosos e lamosos de composição silicosa, com variação na quantidade de grânulo e cascalho biotróficos e no teor de carbonato, a saber: areia silicilástica com grânulos e cascalho, areia siliciclástica, lama terrígena e marga arenosa. O alto conteúdo de carbonato nas amostras é proveniente das conchas de bivalves e gastrópodes.

A área fonte de sedimentos para o sistema Pisa Sal está relacionada, exclusivamente, à geologia local, cujas partículas são transportados pelas correntes de marés, ventos e chuvas, uma vez que o aporte fluvial é inexistente. Estas fontes referem-se às areias lamosas das planícies de supramaré, aos sedimentos eólicos fixos, às lamas das planícies de intermarés e das planícies de inundação. Partículas oriundas da Formação Barreiras também podem alcançar o sistema através de escoamento superficial. O sumidouro de sedimentos está, predominantemente,

relacionado à ação das fortes correntes de marés vazantes que transportam partículas por tração de fundo e suspensão em direção a sua desembocadura. Secundariamente, ocorrem perdas de sedimento pelo transporte eólico nas planícies de supramaré e nas zonas de planície de inundação.

As fontes de sedimentos dos CDs estão associadas às areias lamosas de supramaré, às lamas de intermaré, às areias eólicas fixas, aos sedimentos dos taludes dos viveiros, ao material do interior dos viveiros (sedimentos, restos de ração, carapaças, fezes de camarão, calcário e cal virgem) e às conchas de moluscos. Por outro lado, as perdas de sedimentos dos canais estão associadas ao transporte de sedimentos de fundo e em suspensão pelas correntes de marés de vazante em direção ao canal do Pisa Sal.

iv) Corrente e Propriedades Termohalinas

De uma forma geral, o comportamento da componente longitudinal da velocidade (u) apresenta-se simétrica a fracamente assimétrica durante o inverno e verão e nas fases de quadratura e sizígia.

Durante o inverno, todo canal do Pisa Sal apresenta velocidade constante na ordem de 0,27 m/s, diferentemente do verão, quando as velocidades variam ao longo do canal, mostrando maior e menor velocidade respectivamente na desembocadura (0,26 m/s) e porção intermediária (0,24 m/s). Na cabeceira do canal, a velocidade apresenta-se ligeiramente mais elevada que na porção intermediária do canal. As velocidades médias e máximas de vazante, em todas as fases deste estudo, são maiores que as velocidades de enchente. As direções da componente u de vazante e enchente orientam-se concordantes com a direção do canal, nas direções respectivas: NW-NNW e SE-SSE, refletindo a orientação regular da batimetria. As velocidades residuais (u_a) no inverno indicam predominância para vazante, enquanto no verão, mostram tendência tanto para vazante quanto para enchente, com valores variando de -0,02 m/s a 0,02 m/s.

As velocidades nos canais artificiais de pesca (CDs) apresentam velocidades de vazante superiores às de enchente, bem como superiores a aproximadamente iguais às das margens do canal Pisa Sal ($v_z = 0,16$ m/s e $e_c = 0,17$ m/s), onde o CD1 e CD2 apresentam velocidade média respectivas de 0,24 e 0,15 m/s. Esta relação deve-se às dimensões (comprimento, largura e profundidade), a

configuração geométrica, ao gradiente e à orientação em relação à foz. As direções predominantes das correntes são paralelas a orientação dos canais.

A temperatura, a salinidade e a densidade médias da coluna d'água durante o verão são mais elevadas que durante o inverno, cujos maiores valores são observados durante as marés de quadratura em todas as estações. As diferenças de temperatura e salinidade aumentam canal acima, o que indica um comportamento semelhante ao padrão de circulação inversa segundo a classificação de estuário proposta por Cameron e Pritchard (1963). A variação vertical da temperatura na superfície mostra valores elevados no verão e valores altos e baixos no inverno. A salinidade ao longo do ano, principalmente no verão, apresenta valores mais elevados próximo ao fundo. A alta evaporação, o descarte de efluentes das salinas e carcinicultura, além da ausência de contribuição fluvial são os principais fatores responsáveis pela variação da salinidade.

O canal Pisa Sal é classificado como um canal de maré com características hipersalinas, comportamento de um estuário inverso (negativo), verticalmente bem misturado, forçado predominantemente pela maré, no qual o processo de difusão turbulenta da maré é responsável pelo transporte de sal e provoca a redução da salinidade ao longo do ano.

v) Erosão

Zonas erosivas nos canais do sistema Pisa Sal ocorrem associadas à margem côncava dos meandros. De uma forma geral, na maioria dos perfis estudados ocorre predominância da erosão sobre a deposição, com um valor médio anual de 45,12 m³/m. A taxa média de recuo anual das escarpas de erosão varia de 0,09 a 0,72 m/ano. O volume total erodido nas zonas de influência dos perfis monitorados é de 9.775,88 m³/ano.

A escavação artificial dos canais de pesca (CDs) e dos viveiros acompanhando a franja de mangue estabeleceu uma configuração irregular para ambos, fato que permitiu a preservação de todo esse bioma na área da fazenda da Camarus, entretanto, alguns trechos dos CDs mostram fortes ângulos com elevada sinuosidade que desencadeou zonas de intensa erosão. Portanto, o volume médio anual de material erodido no CD1 e CD2 é respectivamente 60,41 e 27,41 m³/m. A taxa média de recuo anual das escarpas de erosão do CD1 e CD2 é respectivamente 0,27 m e 0,33 m.

O volume total erodido nas zonas de influência dos perfis monitorados nos dois CDs foi de 2.155,20 m³/ano, o qual é proveniente, principalmente, dos taludes dos viveiros que bordejam os canais e, em menor proporção, das planícies de marés (sedimentos lamosos).

A erosão no sistema Pisa Sal é causada por fenômenos oceanográficos, climáticos e antrópicos, dentre os quais destacam-se: as marés, as correntes de marés, a chuva, escoamento superficial, vento, ondulações, escavação de canais, infiltração, composição e manutenção de taludes. Como consequência da ação desses agentes dinâmicos, ocorrem movimentos de massa de pequena escala do tipo escorregamento e queda de bloco.

A escavação e represamento de canais em zonas de planícies de marés para carcinicultura e salinas modificam sobremaneira a hidrodinâmica local, contribuindo para a instalação de processos erosivos que alteram a morfologia local, contribuem para o assoreamento dos canais e provocam mortandade de espécies vegetais e animais com a redução do seu espaço geográfico.

vi) Transporte de Sedimentos

O transporte de sedimentos de fundo e suspensão no sistema Pisa Sal é controlado pela variação da velocidade das correntes de marés, onde o transporte é mais eficiente durante as marés de sizígia e nos ciclos de vazante (exportação). Não existe fluxo fluvial perene, e, conseqüentemente, o aporte de sedimentos, entretanto, durante o período de chuvas ocorre incipiente escoamento superficial em direção ao sistema Pisa Sal.

O transporte de fundo no canal Pisa Sal ocorre, exclusivamente, nas marés de vazante e enchente de sizígia, durante o inverno e o verão. A carga de fundo média anual transportada na desembocadura e cabeceira do sistema é da ordem de 1.170,76 m³ e 1.593,92 m³. Nos canais de pesca (CD1 e CD2), a exportação anual média é da ordem de 702,96 m³. A carga em suspensão anual exportada na região da desembocadura e cabeceira do canal Pisa Sal é da ordem de 2.424,72 e 833,04 m³, respectivamente. Nos canais de pesca, a média da carga em suspensão é 104,04 m³. Portanto, A carga total anual exportada na região da desembocadura e cabeceira do canal Pisa Sal é 3.595,48 e 2.426,96 m³, respectivamente, enquanto, nos CDs, a carga exportada é de 807,00 m³

O transporte de sedimentos em suspensão no canal Pisa Sal deve-se ao mesmo processo de difusão turbulenta da maré, também responsável pelo transporte de sal. Por outro lado, o mecanismo de transporte marginal das lamas resuspensas pela ação de pequenas marolas formadas pela atividade do vento na superfície da água também é responsável por significativa quantidade de material exportado. Este mecanismo gera uma pluma de sedimentos em suspensão marginal que é transportada pelas correntes de vazante.

vii) Idade e Taxa de Sedimentação

A idade obtida para os sedimentos de barra de pontal no canal Pisa Sal foi de 1562 ± 22 cal AP, enquanto no depósito de barra de pontal do canal Volta do Sertão a idade obtida foi $332-432 \pm 25$ anos cal AP.

A taxa de sedimentação dos canais Pisa Sal e Volta do Sertão são aproximadamente iguais, com taxas médias respectivas de 0,47 e 0,50 cm/ano, indicando que nos últimos 140 anos as condições climáticas e hidrodinâmica da região mantêm-se inalteradas até os dias atuais.

O início da deposição dos sedimentos atuais no Pisa sal e Volta do Sertão ocorreu a partir dos anos de 1868 e 1883, respectivamente. As maiores taxas de sedimentação ocorreram a partir do ano de 2002 e não apresentam relação com o aporte fluvial e/ou o período das chuvas. Entretanto, o intenso uso do solo pelas atividades de carcinicultura e salinas, provoca erosão e conseqüente disponibilidade de sedimentos para o interior dos canais.

viii) Alterações Ambientais

As atividades econômicas da indústria salinera, da carcinicultura e da indústria petrolífera associadas aos fenômenos naturais (temperatura do ar e nível de evaporação alto, índice de precipitação baixo, regime de mesomaré, velocidade alta das correntes de marés e ação dos ventos) contribuem para alterações ambientais que ocorrem no sistema Pisa Sal, e por extensão, ao complexo estuarino lagunar de Galinhos-Gumaré. As principais intervenções que contribuem com estas modificações são:

- Supressão da cobertura de mangue para construção de fazendas de cultivo de camarão e ampliação do parque salineiro.

- Barramento de canais para construção e ampliação de fazendas de cultivo de camarão e de evaporadores e cristalizadores das salinas.

- Desvio e dragagem de canais.
- Escavação de canais de abastecimento, despesca (CDs) e viveiros.
- Lançamento de efluentes das salinas e carcinicultura com elevada salinidade e temperatura, altas concentrações de substâncias químicas, orgânicas e sedimentos suspensos.

- Instalação de portos e estações de bombeamento nas margens dos canais.
- Perfuração e manutenção de poços de petróleo e gás.
- Derramamento de óleo.

Estas intervenções provocam impactos ambientais cumulativos de baixa a alta magnitude no sistema Pisa Sal, que contribuem para a degradação deste sistema causando importantes alterações de caráter físico, químico, biológico e sócio-econômico, como as apresentadas a seguir.

- Mortandade da fauna e flora local, principalmente peixes, crustáceos e do ecossistema manguezal.

- Estabelecimento e incremento dos processos erosivos nas margens dos canais artificiais e disponibilização de sedimentos.

- Transporte de sedimentos de fundo e em suspensão em direção à desembocadura do sistema.

- Formação de bancos arenosos e lamosos na desembocadura do sistema.

- Formação de bancos e escavação de canais no leito do canal principal em frente a desembocadura dos canais de despesca (CDs).

- Alteração da profundidade e morfologia dos canais decorrentes das dragagens e dos bombeamentos de água para abastecimento dos viveiros.

- Aumento da salinidade e densidade da água, contribuindo para as condições químicas de hipersalinidade.

- Aumento de nutrientes (P e N) e de algas que podem desencadear o processo de eutrofização.

ix) Recomendações

Por fim, seguem algumas recomendações para futuros estudos e ações preventivas de forma a garantir o equilíbrio ambiental deste sistema.

- Levantamento batimétrico, sonográfico e amostragem de sedimentos de fundo com periodicidade anual, principalmente na desembocadura do complexo estuarino lagunar Galinhos-Guamaré, nas zonas portuárias e nas desembocaduras de canais artificiais de pesca e estações de bombeamento.
- Levantamento das correntes e propriedades termohalinas durante o período das chuvas e estiagem, nas marés de quadratura e sizígia.
- Estudo do nível de clorofila, da identificação e contagem de algas, bem como do conteúdo de sólidos suspensos.
- Mapeamento das áreas de mangue e estudo das suas relações com as alterações ocorridas no meio aquático.
- Instalação e manutenção de estação fluviométrica no complexo estuarino lagunar Galinhos-Guamaré.
- Instalação e manutenção de estação maregráfica ou régua de maré no porto de Guamaré.
- Instalação e manutenção de estação meteorológica permanente no município de Galinhos ou Guamaré.
- Construção de rede de drenagem pluvial e manutenção permanente dos taludes dos viveiros.
- Proposta para implantação de uma Unidade de Conservação Ambiental, envolvendo os municípios de Galinhos e Guamaré, de forma que contemple os seguintes ambientes: transição entre o tabuleiro costeiro e a planície costeira, sob influência das marés (canais, planícies de marés e mangues), sob influência eólica (dunas fixas e móveis), sob influência da zona costeira (praia, rochas de praia, deltas de maré vazante e enchente, pontais arenosos e ilhas barreiras) e o sob influência oceânica (dunas subaquáticas e recifes de corais e algas).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alheiros, M.M. & Lima Filho, F.M. 1991. *Revisão geológica da faixa costeira de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte e do seu embasamento - a Formação Barreiras*. Recife, DGEO/UFPE, Boletim 10, p. 77-88.
- Allen, J.R.L., Rae, J.E., Longworth, G., Hasler, S.E., Ivanovich, M. 1993. A comparison of the ^{210}Pb dating technique with three other independent dating methods in an oxic estuarine salt-marsh sequence. *Estuaries*, **16**(3B):670-677.
- Appleby, P.G. & Oldfield, F. 1978. The calculation of ^{210}Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. *Catena*, **5**:1-8.
- Araripe, P.T. & Feijó, F.J., 1994. Bacia Potiguar. *Revista de Geociências da Petrobrás*, **8**(1):127-141.
- Arnaud-Fassetta, G., Bertrand, F., Costa, S., Davidson, R. 2006. The western lagoon marshes of the Ria Formosa (Southern Portugal): Sediment-vegetation dynamics, long-term to short-term changes and perspective. *Continental Shelf Research*, **26**:363-384.
- A.S.C.E. Task Force on Bedforms in Alluvial Channels. 1966. Nomenclature for bedforms in alluvial channels. Am. Soc. Civil Eng., *Journal Hydraulics Division*, **92** (HY3):51-64.
- Ashley, G.M. 1978. Bedforms in the Pitt River, British Columbia. In: Miall, A.D. (ed.) *Fluvial Sedimentology*, Can. Soc. Pet. Geol., 5:89-104.
- Ashley, G.M. 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Petrology*, **60**(1):160-172.
- Ashworth, P.J. & Ferguson, R.I. 1989. Size-selective entrainment of bed load in gravel bed streams. *Water Resour. Res.*, **25**:627-634.
- Asmus, H.E. & Guazelli, W. 1981. Descrição sumária das estruturas da margem continental brasileira e das áreas oceânicas e continentais adjacentes. In: PETROBRAS. Estruturas e tectonismo da margem continental brasileira e suas implicações nos processos sedimentares e na avaliação do potencial dos recursos minerais. Rio de Janeiro, CENPES/DIMEP, p. 187-269.

Augusto Filho, O. 1994. *Cartas de risco de escorregamento: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo-SP, 172 p.

Bagnold, R.A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. U.S. Geol. Survey, *Proc Paper* 442-I.

Benoit. G., Wang. E.X., Nieder. W.C., Levandosky. M., Breslin, V.T. 1999. Sources and history of heavy metal contamination and sediment deposition in Tivoli South Bay, Hudson River, New York. *Estuaries*, **22**:167-178.

Bertani, R.T., Costa, I.G., Matos, R.M.D. 1990. Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar. *In*: Raja Cabaglia, G.P., Milani, E.J. (eds), *Origem e evolução das bacias sedimentares*. Rio de Janeiro, PETROBRAS. p. 291-391.

Bezerra F.H.R., Barreto, A.M.F., Suguio, K. 2003. Holocene sea-level history on the Rio Grande do Norte State coast, Brazil. *Marine Geology*, **196**:73-89.

Bezerra F.H.R., Lima Filho, F.P., Amaral, R.F., Caldas, L.H.O., Costa Neto, L.X.C. 1998. Holocene coastal tectonics in NE Brazil. *In*: Stewart, I.S. & Vita Finzi, C. (eds) *Coastal Tectonics*. Geological Society, 146, Special Publications, p. 279-293.

Bigarella, J.J. 1975. *The Barreiras Group in Northeastern Brazil*. Porto Alegre, Academia Brasileira de Ciências, *Anais*, p. 365-393.

Binford, M.W. & Brenner, M. 1986. Dilution of ^{210}Pb by organic sedimentation in lakes of different trophic states, and application to studies of sediment-water Interactions. *Limnol. Oceanography*, **31**(3):584-595.

Bird, M.I., Fifield, L.K., Turney, C.S.M., Santos, G.M. 2004. Datações próximo ao limite da técnica radiocarbono. *In*: FUMDHAM, Encontro de Física e Arqueologia na Região do Parque Nacional Serra da Capivara: Descobertas e Datações, 1, *Anais*, p. 27-48.

Birkemeier, W.A. 1981. *Fast, accurate two-person beach survey*. Vicksburg, Coastal Engineering Research Center, *Coastal Engineering Technical*, 22 p.

- Boguchwal, L.A. & Southard, J.B. 1990. Bedform configurations in steady unidirectional water flows. Part 1: Scale model study using fine sands. *Journal of Sedimentary Petrology*, **60**(5):649-657.
- Bridge, J.S. 1985. Paleochannel patterns inferred from alluvial deposits: a critical evaluation. *Journal of Sedimentary Petrology*, **55**:579-589.
- Caldas, L.H.O. 2002. *Late quaternary coastal evolution of the northern rio grande do norte coast, NE Brazil*. PhD Thesis, Institute of Geosciences University Christian-Albrechts zu Kiel, Kiel-Germany., 92 p.
- Caldas, L.H.O., Oliveira Junior, J.G., Medeiros, W. E., Stattegger, K., Vital, H., 2006a. Geometry and evolution of holocene transgressive and regressive barriers on the semi-arid coast of NE Brazil. *Geo-Marine Letters*, **26**(5): 249-263.
- Caldas, L.H.O., Stattegger, K., Vital, H. 2006b. Holocene sea-level history and coastal evolution: Evidences from coastal sediments of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil. *Marine Geology*, **228**:39-53.
- Camarero, L., Masqué, P., Devos, W., Ani-Ragolta, I., Catalán, J., Moor, H.C. 1998. Historical variations in lead fluxes in the Pyrenees (northeast Spain) from a dated lake sediment core. *Water, Air and Soil Pollut.*, **105**:439-449.
- CAMARUS AQUACULTURA DO NORDESTE LTDA. 2003. Estudo de Impacto Ambiental (EIA-RIMA), Diagnóstico Ambiental - Meio Físico, 253 p.
- Camerom, W.M. & Pritchard, D.W. 1963. Estuaries. In: Hill, M.N. (ed). *The sea. Ideas and observations on progress in the study of the seas*. New York, Interscience, p. 306-324.
- Carter, R.W.G. 1993. Coastal Environments. Academic Press, London, 4^a Ed., 617 p.
- Campos e Silva, A. 1966. O Grupo Barreiras na região de Natal. Natal, Instituto de Antropologia Câmara Cascudo/UFRN, Relatório e Comunicação, **1**:1-4.
- Cestaro, L.A. 1994. Os elementos do clima de Galinhos, RN como recursos naturais à disposição do homem. Natal, Caderno Norte Riograndense - Temas Geográficos, **8**(1):13-28.

Chaves, M.S. 2006. *Caracterização da dinâmica ambiental da região litorânea do Campo de Serra, município de Macau/RN utilizando dados de sensoriamento remoto, sedimentologia, geofísica praial e vulnerabilidade costeira*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte/PPGG, 200 p.

Chaves, M.S. & Vital, H. 2001. Caracterização geoambiental dos parâmetros de onda entre o trecho praial da ponta do Tubarão e gamboa do Corta-Cachorro, Macau/RN. *In*: ABEQUA, Congresso Brasileiro do Quaternário, Boletim de Resumos, p. 554-556.

Chaves, M.S., Vital, H., Silveira, I.M. 2006. Beach morphodynamic of the Serra oil field, northeastern Brazil. *Journal of Coastal Research*, **39**:594-597.

Chen, Z., Kostaschuk, R., Yang, M. 2001. Heavy metals on tidal flats in the Yangtze estuary, China. *Environ. Geol.*, **40**:742-749.

Ciavola, P., Organo, C., Vintró, L.V., Mitchell, P.I. 2002. Sedimentation processes on intertidal areas of the lagoon of Venice: Identification of exceptional flood events (acqua alta) using radionuclides. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, **36**:139-147.

Coelho, M.S., Gan, M.A. e Conforte, J.C. 2004. Estudo da variabilidade da posição e da nebulosidade associada à ZCIT do Atlântico, durante a estação chuvosa de 1998 e 1999 no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, **19**(1): 23-34.

Costa Neto, L.X. 1997. *Evolução geológica geomorfológica recente da plataforma interna ao largo do delta do rio Açu, Macau-RN*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense-LAGEMAR, 213 p.

Costa Neto, L.X., Rocha, A.M.R., Pena, O.M.L., Lima, J.C.F., Lopes, L.A.A., Medeiros, M.B.B., Cabral, A.P. 2004a. Geologia da área de intervenção de uma fazenda de criação de camarão no município de Galinhos-RN. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, XLII, Anais, CD-Room, S17, p. 667.

Costa Neto, L.X., Rocha, A.M.R., Pena, O.M.L., Lima, J.C.F., Lopes, L.A.A., Medeiros, M.B.B., Cabral, A.P. 2004b. Correntes de marés no estuário do rio Pisa Sal, Galinhos-RN: uma primeira aproximação. *In*: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, XX, Anais, CD-Room, p. 517-518.

da Silva, M.P. da. 2005. Cinemática e dinâmica de estuários. São Paulo, IO/USP, Material Didático, 13 p.

da Silva, M.P. da, Miranda, L.B., Ramos e Silva, C.A., Frazao, E.P., Souza, F.E.S. 2006. Caracterização Física de Estuários Hipersalinos do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, Brasil. *In: Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2, Anais.*

Dalrymple R.W., Zaitlin B.A., Boyd R. 1992. Estuary facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, **62**(2):1130-1146.

David, L.T. & Kjerfve, B., 1998. Tides and currents in a two-inlet coastal lagoon: Laguna de Términos, México. *Continental Shelf Research*, **18**:1057-1079.

Davies, J.H. 1964. A morphogenic approach of world shorelines. *Geomorphology*, **8**:127-142.

Dellapenna, T.M., Kuehl, S.A., Schaffner, L.C. 2003. Ephemeral deposition, seabed mixing and fine-scale strata formation in the York River estuary, Chesapeake Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **58**:621-643.

Dias, G.T.M. 1996. Classificação de sedimentos marinhos, proposta de representação em cartas sedimentológicas. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 39, Anais*, **3**:423-426.

Dibbern, H. 2007. *Sedimentdynamik im estuarin-tidalen Kanalsystem Rio Catanduba und Rio Volta do Sertão, Rio Grande do Norte, Nordost Brasilien*. Diplomarbeit, Institut für Geowissenschaften IFG - Christian-Albrechts-Universität, Kiel, 76 p.

Diniz, R.F. 2003. *A erosão costeira ao longo do litoral oriental do Rio Grande do Norte: causas, conseqüências e influência nos processos de uso e ocupação da região costeira*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia-UFBA, 180 p.

Dyer, K.R. 1997. Estuaries: A physical introduction. Chichester, Wiley, 2ª ed., 195 p.

EMPRESA DE CONSULTORIA E PLANEJAMENTO AMBIENTAL/ECOPLAN. 2000. Atividade de produção de petróleo e gás natural nas Bacias Potiguar e Ceará. Relatório de Avaliação Ambiental (RAA) - Plataformas PUB 2 e PAG 2. Natal-RN.

ENERGIAS RENOVÁVEIS DO BRASIL LTDA/ENERBRASIL. 2002. Estudo ambiental - Fazendas eólicas nos municípios de Extremoz, Rio do Fogo, Touros, Areia Branca e Macau. Estudo Ambiental Simplificado-EAS, Kohän-Saagoyen Consultoria e Sistemas Ltda, Riod e Janeiro-RJ, 367 p.

Farias, P.R., Castro, J.C., Tibana, P., Barrocas, S.L.S. 1990. Roteiro de Excursão: Cretáceo da Bacia Potiguar. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 36, *Anais*, 43 p.

Fendrich, R. 1988. Emissários em canais para combate à erosão urbana. *In*: Fendrich, R. et al., Drenagem e controle da Erosão Urbana. Educa-PUC-PR, Curitiba, 2ª ed., p. 307-386.

Folk, R.L. 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company, Austin, Texas , 181 p.

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

Fortes, F. 1982. Utilização combinada da fotogeologia com a magnetometria, gravimetria e sísmica, na prospecção de petróleo na Bacia Potiguar. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 32, *Anais*, **5**:2.407-2.416.

Franco, A.S. 2000. Marés: Programas para Previsão e Análise. *In*: Manual BSP, São Paulo, 36 p.

Frazão, E.P. 2003. *Caracterização hidrodinâmica e morfosedimentar do estuário Potengi e áreas adjacentes: subsídios para controle e recuperação ambiental no caso de derrames de hidrocarboneto*. Dissertação de Mestrado, UFRN/PPGG, 195 p.

Frazão, E.P., Vital, H., Schwazer, K., Stattegger, K. 2003. Mapeamento por sonar de varredura lateral das formas de leito do estuário Potengi/RN. *In*: SBGf, International Congresso of the Barzilian Geophysical Society, 8, *Anais*, 1:10-14.

Freire, G.S.S., Cavalcanti, V.M.M., Maia, L.P., Lima, S.F. 1997. Classificação dos sedimentos da plataforma continental do estado do Ceará. *In*: Simpósio de Geologia do Nordeste, 17, *Anais*, **15**:209-211.

- Ginsberg, S.A. & Perillo, G.M.E. 2004. Characteristics of tidal channels in a mesotidal estuary of Argentina. *Journal of Coastal Research*, **20**(2):489-497.
- Goldberg, E.G. 1963. Geochronology with ^{210}Pb . *In: Radioactivity Dating*. IAEA, Vienna, p. 121-131.
- Goldberg, E.D. & Koide, M. 1962. Geochronological studies of deep sea sediments by the ionium/thorium methods. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **26**:417-450.
- Godwin, H. 1962. Half-life of radiocarbon. *Nature*, **195**:984.
- Guerra, A.J.T., Silva, A.S. e Botelho, R.G.M. (Eds.) 1999. *Erosão e conservação dos solos: Conceitos, temas e aplicações*. Ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 340 p.
- Guerra, A.J.T. 1998. Processos erosivos nas encostas. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. *In: A.J.T. Guerra & S.B. Cunha (eds.)*. Ed. Bertrand Brasil, 3ª ed., Rio de Janeiro, p. 149-209.
- Hansen, D.V. & Rattray Jr, M. 1966. New dimensions in estuary classification. *Limnol. Oceanogr*, **11**(3):319-325.
- Harris, P., Fichez, R., Fernandez, J.M., Golterman, H., Badie, C. 2001. Using geochronology to reconstruct the evolution of particulate phosphorus inputs during the past century in the Papeete Lagoon (French-polynesia). *Oceanol. Acta*, **24**:1-10.
- INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E MEIO AMBIENTE DO RIO GRANDE DO NORTE-IDEMA. 1994. Diagnóstico ambiental e sócio-econômico do litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte. Natal, IDEMA, Rel. Int., 284 p.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. 1989. Estudo das instabilizações de encostas da Serra do Mar na região de Cubatão objetivando a caracterização do fenômeno "corrida de lama" e prevenção de seus efeitos. São Paulo, IPT, Relatório Interno nº 26258, 185 p.
- Jardim de Sá E.F. 1994. *A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan-Africana*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 803 p.

- Kjerfve, B. 1986. Comparative oceanography of coastal lagoons. *In*: Wolfe, D. (ed.). *Estuarine Variability*. London, Academic Press, p. 63-82.
- Kjerfve, B. 1987. Estuarine geomorphology and physical oceanography. *In*: Day Jr., J.W., C.H.A.S. Hall, Kemp, W.M. & Yáñez-Arancibia, A. (eds.) *Estuarine Ecology*. New York, Wiley, p. 47-78.
- Larsonneur, C. 1977. La cartographie des depots meubles sur le plateau continental francais: methode mise au point et utilisee en manche. *J. Rech. Oceanogr*, **2**:34-39.
- Leite, F.S. 2007. *Análise da influência do cisalhamento eólico sobre a circulação na região costeira de Guamará-RN, Brasil*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Oceanografia/UFPE, Programa de Pós Graduação em Oceanografia, 167 p.
- Lima, Z.M.C. 1993. *Estudo comparativo e caracterização ambiental da península de Galinhos-RN*. Monografia do Bacharelado, Departamento de Geografia, UFRN, 91 p.
- Lima, Z.M.C. 2004. *Caracterização da dinâmica ambiental da região costeira do município de Galinhos, litoral setentrional do Rio Grande do Norte*. Tese de Doutorado, PPGG/UFRN, 157 p.
- Lima, Z.M.C., Alves, A.L., Amaro, V.E. e Vital, H. 2001. Evolução da Linha de Costa do Esporão de Galinhos (NE-Brasil) - Utilizando Fotografias Aéreas e Imagens Landsat TM. *Pesquisas em Geociências*, Porto Alegre/RS, **28**(2):497-507.
- Lima, Z.M.C., Andrade, P.R.O., Medeiros, W.E., Vital, H. e Stattegger, K. 2006. Evolução de um *spit* tropical (Galinhos-NE Brasil) com base em imagem de radar. Workshop final da primeira fase da Rede Cooperativa Norte-Nordeste em "Monitoramento ambiental de áreas sob a influência da indústria petrolífera", Natal-RN, Anais, p. 2-29.
- Lima, Z.M.C., Vital, H. Tabosa, W.F. 2006. Morphodynamic variability of the Galinhos Spit, Northeastern Brazil. *Journal of Coastal Research*, **39**:598-601.
- Lima, Z.M.C., Vital, H., Xavier Neto, P., Medeiros, W.E., Andrade, P.R.O. 2002. Sand spit from northeast Brazil: High-Resolution Quaternary analogs for reservoir models. Houston, Texas , AAPG Annual Meeting, 2002, **11**:A103-A104.

- Mabessone, J.M., Campos e Silva, A. e Beurlen, K. 1972. Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. São Paulo/SP, Revista Brasileira de Geociências, **2**(3):173-188.
- Mabessone, J.M. & Castro, C. 1975. Desenvolvimento geomorfológico do Nordeste Brasileiro. Recife/PE, SBG, Núcleo Nordeste, Boletim Informativo, **3**:5-36.
- Maia, L.P. 1998. *Procesos costeros y balance sedimentário a lo largo de Fortaleza (NE-Brasil): implicaciones para uma gestão adequada de la zona litoral*. Tesis Doctoral, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, 269 p.
- Miguel, S., Bolívar, J.P., Tenório, R.G. 2003. Mixing, sediment accumulation and focusing using ^{210}Pb and ^{137}Cs . *Journal of Paleolimnology*, **29**:1-11.
- Martin, L. & Dominguez, J. M. L. 1994. Geological history of coastal lagoons. *In*: Kjerfve, B. (ed.) *Coastal Lagoon Processes*. London, Elsevier Oceanography Series, p. 41-66.
- Miller, M.C., McCave, I.N., Komar, P.D. 1977. Threshold of sediment motion under unidirectional currents, *Sedimentology*, **24**:507–527.
- Miranda, L.B., Bérghamo, A.L., Castro, B.M. 2005. Interactions of river discharge and tidal modulation in a tropical estuary, NE Brazil. *Ocean Dynamics*, **55**:430-440.
- Miranda, L.B., Castro, B.M. e Kjerfve, B. 2002. *Princípios de oceanografia física de estuários*. Ed. Edusp, São Paulo, 411 p.
- Morales, J.A., Borrego, J., Jiménez, I., Monterde, J., Gil, N. 2001. Morphostratigraphy of an ebb-tidal delta system associated with a large spit in Piedras estuary mouth (Huelva Coast, Southwestern Spain). *Marine Geology*, **172**:225-241.
- Newton, A. & Mudge, S.M. 2003. Temperature and salinity regimes in a shallow, mesotidal lagoon, the Ria Formosa, Portugal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **57**:73-85.
- Nichols, M. & Allen, G. 1981. Sedimentary processes in coastal lagoons. *In*: Unesco, Technical Papers in Marine Science, **33**:27-80.

Nogueira, A.M.B., Nascimento, J.M.S., Lima, M.S.L., Oliveira, M.I.M. e Srivastava, N.K. 1984. *Geologia da faixa litorânea entre Natal e Graçandu-RN*. Natal/RN, CCE/UFRN, Boletim, **8**:4-48.

Oldfield, F. & Appleby, P.G. 1984. Empirical testing of ^{210}Pb -dating models for lake sediments. In: Hayworth, E.Y., Lund, J.W.G. (eds.) *Lake Sediments and Environmental History*. Leicester University Press, p. 93-124.

Othman, I., Almasri, M., Alrayyes, M., Alrayyes, A.H. 2000. Sedimentation rates and pollution history of the eastern Mediter- ranean sea Syrian coast. *Sci. Tot. Environ.*, **248**:27-35.

Paiva, J.B.D. 1988. Avaliação dos Modelos Matemáticos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em Rios. Tese de Doutorado, USC-SP, 315 p.

Paiva, L.E.D. 1995. Aplicação de métodos macroscópicos na determinação da carga sólida total transportada em rios. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP, 161p.

Parker, G. 1990. Surface-based bedload transport relation for gravel rivers, *J. Hydraul. Res.*, **28**:417–436.

Paschelke, F. 2000. Sedimentological and environmental survey of the channel system near Galinhos, Rio Grande do Norte, Brazil. M.Sc. Thesis, Christian Albrecht University, Germany, 114 p.

Pessoa Neto, O.C., Soares, U.M., Silva, J.G.F., Roesner, E.H., Florencio, C.P., Souza, C.A.V. 2007. *Bacia Potiguar*. Rio de Janeiro, Petrobrás, Boletim de Geociências, 15(2), p. 357-369.

Pierini, J.O., Perillo, G.M.E., Carbone, M.E., Marini, F.M. 2005. Residual low structure at a scour-hole in Bahia Blanca estuary, Argentina. *Journal of Coastal Research*, **21**(4):784-796.

Ponce, R.J.C. 1990. Análise da aplicabilidade e modificações de modelos de cálculo do transporte de sedimento de fundo em rios de médio porte. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 345 p.

Pritchard, D.W. 1952. *Estuarine Hydrography*. New York, Academic Press, **1**:243-280.

Pritchard, D.W. 1955. Estuarine circulation patterns. *In: Am. Soc. Civ. Eng., Proceedings*, **81**(717):1-11.

Pritchard, D.W. 1967. What is an estuary? Physical viewpoint. *In: Lauff G.H. (ed.) Estuaries*. American Association for the Advancement of Science, p. 3-5.

Rangarajan, C., Madhavan, R., Gopalakrishnan, Smt. S. 1986. Spatial and temporal distribution of lead-210 in the surface layers of the atmosphere. *Journal of Environmental Radioactivity*, **3**:23-33.

Reading, H.G. 1993. *Sedimentary environments and facies*. Blackwell Scientific Publications, London, Second edition, 615 p.

Riedel, K. 2000. Untersuchungen zur küstendynamik und küstenentwicklung bei São Bento (NE-Brasilien). M.Sc. Thesis, Christian Albrecht University, Germany, 56 p.

Röber, V., Rotzoll, K., Stattegger, K., Vital, H. 2005. Dynamics of the complex coastal system at Galinhos (RN), NE-Brazil. *Meyniana*, **57**:133-155.

Robbins, J.A. & Edgington, D.N. 1975. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using ^{210}Pb and ^{137}Cs . *Geochim. Cosmochim. Acta*, **39**:285-304.

Saito, R.T., Figueira, R.C.L., Tessler, M.G., Cunha, I. I. L. 2001. ^{210}Pb and ^{137}Cs geochronologies in the Cananeia-Iguape Estuary (São Paulo, Brazil). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **249**(1):257-261.

Santos Neto, F. 2008. Caracterização morfo-sedimentar da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual da Ponta do Tubarão - RN. Relatório de Graduação, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 68 p.

Santos, D.A.S., Vital, H., Silveira, I.M., Chaves, M.S., Lima, Z.M.C. 2003. Caracterização hidrodinâmica em áreas sob influência na indústria petrolífera. *In: Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás*, 2, Anais, p. 241.

Santos, I.R., Burnett, W.C., Godoy, J.M. 2008. Radionuclides as tracers of coastal processes in Brazil: Review, synthesis and perspectives. *Brazilian Journal of Oceanography*, **56**(2):115-131.

Scapin, J. 2005. Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de Santa Maria-RS. Dissertação de Mestrado, PPEC, Universidade de Santa Maria/UFSM, 115 p.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. 1995. *Caracterização das bacias hidrográficas do Rio Grande do Norte*. In: SERHID, Coordenadoria de Gestão de Recursos Hídricos, Relatório Interno, 41 p.

Selby, M.J. 1982. Hillslope materials and processes. Oxford University, 264 p.

Shields, A. 1936. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung, Mitt. Preuss. Versuchsanst. Wasserbau Schiffbau. In: Ott, W.P. & van Uchelen J.C., U.S. Dep. of Agric. Soil Conser. Inst. of Technol, English Translate, 36 p.

Silva, C.G. 1991. *Holocene stratigraphy and evolution of the Açu river delta, Rio Grande do Norte state, Northeastern Brazil*. Doctor of Philosophy, Duke University, Durham, 400 p.

Silva, D.R.V., Amaro, V.E., Ferreira, A.T.S., Souza, A.S., Melo, B.S., Souto, M.V.S. 2005. Mapeamento temático do município de Galinhos/RN, com base na interpretação de imagens multiespectrais do sistema CBERS 2 . In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia-GO, 12, *Anais*, p. 2413-2415.

Silveira, I.M. 2002. Estudo evolutivo das condições ambientais da região costeira do município de Guamaré-RN. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, UFRN, 160 p.

Silveira, I.M, Vital, H., Amaro, V.E., Chaves, M.S. 2006. The evolutionary study of environmental conditions of the coastal area of the Municipal District of Guamaré-RN. *Journal of Coastal Research*, **39**:237-241.

Simons, D.B. & Sentürk, F. 1992. *Sediment Transport Technology, Water and Sediment Dynamics*. Book Crafters Inc., Michigan, U.S.A.

Smith, N. D. 1978. Some comments on terminology for bars in rivers. In: Miall, A. D., (ed.) *Fluvial Sedimentology, Can. Sed. Geol.*, **5**:85-88.

Souza, F.E. 2004. Evolução morfodinâmica da região de influência estuarino do rio Cuiabá/RN, com ênfase nas alterações do ambiente deposicional de manguezal e a integração de geodados em SIG. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, UFRN, 150 p.

Souza, S.M.D. 1982. Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 32, *Anais*, **5**:2392-2406.

Stattegger, K; Caldas, L.H.O., Vital, H. 2006. Holocene coastal evolution of the Northern Rio Grande do Norte Coast, Brazil.. *Journal of Coastal Research*, **39**:150-155.

Steiner, B., Hanselmann, K.W., Krahenbuhl, U. 2000. Dating AMD heavy metals contents of sediment cores of a high Alpine, remote lake Jorisee (Switzerland). *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, **78**:131-148.

Strobel, O.M., Massunari, I.S., Saks, N.C.O., Kazawa, Y. 1981. Aplicação de algumas metodologias para avaliação de transporte de sedimentos. Departamento de Engenharia Hidráulica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Stuiver, M. & Polach, H.A. 1977 Discussion: Reporting of ¹⁴C data. *Radiocarbon*, **19**(3):355-363.

Stuiver, M., Reimer, P.J., Bard, E., Beck, J.W., Burr, G.S., Hughen, K.A., KromeR, B., McCormac, G., van Der Plicht, J., Spurk, M. 1998. INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon*, **40**(3):1041-1083.

Stuiver, M., Reimer, P.J., Braziunas, T.F. 1998. High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon*, **40**(3):1.041-1.083.

Suguio, K., Martin, L., Bittencourt, A.C.S.P., Dominguez, J.M.L., Flexor, J.M., Azevedo, A.E.G. 1985a. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário Superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. *Rev. Bras. Geoc.*, **15**:273-286.

Suguio, K.; Martin, L.; Flexor, J.M.; Tessler, M.G.; Eichler, B.B. 1985b. Depositional mechanisms active during the late Quaternary at the Paraíba do Sul river mouth area, State of Rio de Janeiro. Brazil. Quaternary of South America and Antarctic Peninsula, **3**:175-185.

Tabosa, W.F. 2006. *Morfologia e sedimentologia da plataforma continental brasileira adjacente a São Bento do Norte e Caiçara do Norte - RN/NE - Brasil*. Dissertação de Mestrado, PPGG/UFRN, 112 p.

TECNOAMBIENTE/GEOCONSULT. 2000. Projeto de recuperação da praia de Areia Preta, Natal - RN. Estudo de Impacto Ambiental-EIA, 66 p.

Tomczak, M. 2000. An introduction to online physical oceanography. *Oceanography* **13**:104-105.

Vanoni, V.A. & Brooks, N.H. 1957. Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams. California Institute of Technology, Sedimentation Laboratory, California, Report E-68.

van Rijn, L.C. 1984a. Sediment transport, Part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulics Engineering*, **110**(10):1431-1436.

van Rijn, L.C. 1984b. Sediment transport, Part II: Suspend load transport. *Journal of Hydraulics Engineering*, **110**(11):1613-1641.

van Rijn, L.C. 1984c. Sediment transport, Part III: Bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraulics Engineering*, **110**(11):1733-1754.

Vilaça, J.G. 1986. Geologia Ambiental costeira da região de Extremoz-RN. Relatório de Graduação, Departamento de Geologia, UFRN, 265 p.

Vital, H. 1989. Estudo do Geosistema do Lago Arari, Ilha de Marajó-PA. Dissertação de Mestrado, Centro de Pós Graduação em Geociências, UFPA, 105 p.

Vital, H., Silveira, I.M. e Amaro, V. E. 2005. Carta sedimentológica da plataforma continental brasileira – Área Guamaré a Macau (NE Brasil), utilizando integração de dados geológicos e sensoriamento remoto. *Rev. Bras. Geof.*, **23**(3):233-241.

Vital, H. Stattegger, K., Amaro, V.E., Schwarzer, K., Frazão, E.P., Tabosa, W.F. & Silveira, I.M. 2008. A modern high-energy siliciclastic–carbonate platform: continental shelf adjacent to northern Rio Grande do Norte state, Northeastern Brazil. *In: Recent Advances in Models of Siliciclastic Shallow-Marine Stratigraphy*, SEPM Special Publication, **90**:175-188.

APÊNDICES

Apêndice 6.1 Frequência simples (%) da fração retida das amostras de fundo do sistema Pisa Sal.

Apêndice 6.2 Percentuais de cascalho, areia, lama, areia+lama, carbonato e matéria orgânica nas amostras de fundo no sistema Pisa Sal.

Apêndice 6.3 Parâmetros estatísticos (mediana, média, selecionamento, assimetria e curtose) e classificação das amostras de fundo segundo Vital *et al.* (2005) do sistema Pisa Sal.

Apêndice 9.1 Concentração mensal e concentração média no inverno e verão de sólidos em suspensão (SS) em amostras de água superficial nas estações E1 e E3.

Apêndice 10.1 Dados da atividade do ^{210}Pb e os cálculos da idade em função da profundidade no testemunho TUGA-02 (Dibbern, 2007).

Apêndice 10.2 Dados da atividade do ^{210}Pb e os cálculos da idade em função da profundidade no testemunho TUGA-03B (Dibbern, 2007).

Apêndice 6.1. Frequência simples (%) da fração retida das amostras de fundo do sistema Pisa Sal, Galinhos/RN.

Amostra	UTM E	UTM N	FRAÇÃO RETIDA (Frequência simples, %)																			
			2,00	1,40	1,00	0,70	0,50	0,35	0,25	0,18	0,13	0,09	0,06	45,00	30,00	15,00	7,50	4,00	2,00	1,00	0,50	0,25
	m		mm											µm								
CM1	801002,080	9435415,938	6,97		3,06		17,12		22,34		34,50		15,13		0,40	0,24	0,13	0,06	0,04			
CM2	801103,890	9435403,738	3,55		4,10		18,84		35,39		26,20		11,86		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01			
CM3	801170,125	9435407,122	0,00		2,22		1,70		2,15		0,52		75,01		5,36	4,39	4,13	3,17	1,35			
CM4	801447,607	9434987,355	0,45		0,50		2,79		2,68		29,11		61,51		1,18	0,72	0,52	0,41	0,14			
CM5	801453,388	9434880,734	14,17		4,02		3,93		1,91		48,96		26,54		0,15	0,12	0,09	0,06	0,04			
CM6	801415,060	9434839,072	0,00		3,01		3,13		2,11		33,29		57,78		0,29	0,14	0,11	0,09	0,06			
CM7	801582,586	9434701,017	0,00		1,64		1,22		0,52		0,66		90,60		2,29	1,48	0,81	0,44	0,34			
CM8	801635,590	9434753,489	1,31		0,42		10,98		50,27		15,27		21,69		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01			
CM9	801583,920	9434853,635	0,73		4,16		36,01		41,74		13,74		3,33		0,10	0,07	0,06	0,04	0,02			
CM10	801663,297	9434793,099	1,03		0,84		11,48		57,61		16,79		12,18		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01			
CM11	801880,962	9434652,754	1,51		0,70		7,63		42,69		27,22		20,19		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01			
CM12	801885,421	9434596,505	18,36		7,11		14,17		12,61		13,60		33,15		0,48	0,20	0,17	0,11	0,05			
CM13	801848,709	9434530,070	7,79		2,01		2,10		0,47		13,31		72,21		0,90	0,55	0,41	0,16	0,09			
CM14	802272,374	9434253,896	0,67		0,64		1,52		0,78		32,85		62,93		0,25	0,19	0,08	0,05	0,04			
CM15	802352,345	9434270,133	2,74		1,31		6,11		50,10		35,30		4,38		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01			
CM16	802390,928	9434286,350	15,58		3,34		18,47		35,49		14,68		12,12		0,10	0,09	0,07	0,04	0,03			
CM17	802735,138	9433923,270	14,46		4,41		5,32		2,45		30,86		41,96		0,27	0,10	0,08	0,06	0,03			
CM18	802728,816	9433851,631	1,28		1,10		7,17		61,76		19,12		9,51		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01			
CM19	802702,670	9433831,558	0,67		0,73		0,55		0,34		47,39		49,70		0,27	0,13	0,12	0,07	0,04			
CM20	802980,420	9433424,141	0,25		1,23		2,33		0,98		37,16		56,93		0,49	0,26	0,17	0,15	0,05			
CM21	803043,188	9433386,584	3,08		2,35		13,05		40,57		30,33		10,56		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01			
CM22	803076,632	9433368,966	7,54		1,63		4,38		1,24		56,53		27,82		0,32	0,19	0,16	0,15	0,04			
CM23	803307,135	9432927,648	13,34		2,15		4,24		0,65		51,54		27,38		0,27	0,18	0,13	0,07	0,03			
CM24	803314,685	9432894,519	3,25		2,36		13,06		57,05		12,06		12,15		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01			
CM25	803316,656	9432877,017	0,83		0,31		0,52		0,37		49,87		47,78		0,11	0,08	0,07	0,04	0,02			
CM26	803419,554	9432408,089	13,10		1,51		7,00		30,19		12,79		35,35		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01			
CM27	803481,500	9432422,137	1,97		1,20		1,44		1,79		35,18		55,30		1,36	0,88	0,51	0,31	0,06			
CM28	803531,230	9432443,946	1,73		2,42		4,43		2,42		0,73		72,48		6,43	3,48	2,87	2,47	0,56			
E1	801040,000	9435484,000	10,32	16,43	8,38	5,25	23,68	20,82	9,42	2,65	1,20	1,09	0,34	0,10	0,00	0,00	0,00	0,08	0,16	0,08	0,00	0,00
E2	801415,000	9434918,000	0,00	0,00	0,42	11,81	45,16	35,08	3,66	0,44	1,76	0,94	0,21	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,21	0,14	0,01	0,00
E3	803163,000	9433046,000	15,72	14,21	14,18	26,12	26,07	3,19	0,00	0,00	0,00	0,43	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00
PS1	803174,000	9432675,000	0,34	0,00	0,00	2,51	27,06	26,13	20,73	11,51	4,77	3,03	1,13	0,73	0,74	0,39	0,07	0,24	0,38	0,23	0,02	0,00
PS2	803140,590	9432692,870	0,21	0,00	0,00	2,63	28,40	30,54	23,81	8,20	2,04	2,27	0,79	0,25	0,18	0,00	0,00	0,14	0,33	0,20	0,02	0,00

Apêndice 6.1. Continuação.

[illegible]

Apêndice 6.2. Percentuais de cascalho, areia, lama, areia+lama, carbonato e matéria orgânica nas amostras de fundo do sistema Pisa Sal, Galinhos/RN.

Amostra	UTM E	UTM N	C	A	L	A + L	CaCO3	MO
	m		%					
CM1	801002,080	9435415,938	6,97	92,15	0,87	93,03	23,75	1,00
CM2	801103,890	9435403,738	3,55	96,38	0,06	96,45	11,75	1,00
CM3	801170,125	9435407,122	0,00	81,61	18,39	100,00	15,20	6,50
CM4	801447,607	9434987,355	0,45	96,59	2,97	99,55	25,00	3,00
CM5	801453,388	9434880,734	14,17	85,37	0,46	85,83	24,25	0,90
CM6	801415,060	9434839,072	0,00	99,31	0,69	100,00	11,00	1,00
CM7	801582,586	9434701,017	0,00	94,65	5,35	100,00	20,00	5,00
CM8	801635,590	9434753,489	1,31	98,63	0,06	98,69	3,75	1,00
CM9	801583,920	9434853,635	0,73	98,99	0,29	99,27	5,50	1,00
CM10	801663,297	9434793,099	1,03	98,91	0,06	98,97	4,5	2,00
CM11	801880,962	9434652,754	1,51	98,43	0,06	98,49	10,50	0,90
CM12	801885,421	9434596,505	18,36	80,64	1,00	81,64	4,50	1,00
CM13	801848,709	9434530,070	7,79	90,10	2,11	92,21	20,88	6,00
CM14	802272,374	9434253,896	0,67	98,72	0,61	99,33	6,25	3,50
CM15	802352,345	9434270,133	2,74	97,20	0,06	97,26	5,75	1,00
CM16	802390,928	9434286,350	15,58	84,11	0,32	84,42	25,	1,5
CM17	802735,138	9433923,270	14,46	84,99	0,55	85,54	8,40	3,00
CM18	802728,816	9433851,631	1,28	98,65	0,06	98,72	5,50	1,00
CM19	802702,670	9433831,558	0,67	98,71	0,62	99,33	13,25	2,00
CM20	802980,420	9433424,141	0,25	98,63	1,12	99,75	25,00	4,00
CM21	803043,188	9433386,584	3,08	96,85	0,06	96,92	7,25	1,5
CM22	803076,632	9433368,966	7,54	91,60	0,86	92,46	14,5	4,5
CM23	803307,135	9432927,648	13,34	85,97	0,68	86,66	6,00	3,50
CM24	803314,685	9432894,519	3,25	96,69	0,06	96,75	8,13	1,00
CM25	803316,656	9432877,017	0,83	98,86	0,32	99,17	3,75	1,5
CM26	803419,554	9432408,089	13,10	86,83	0,07	86,90	10,25	1,5
CM27	803481,500	9432422,137	1,97	94,91	3,13	98,03	21,25	5,00
CM28	803531,230	9432443,946	1,73	82,47	15,80	98,27	25,00	13,00
E1	801040,000	9435484,000	10,32	89,26	0,42	89,68	3,24	0,995
E2	801415,000	9434918,000	0,00	99,48	0,52	100,00	0,48	0,599
E3	803163,000	9433046,000	15,72	84,23	0,05	84,28	1,70	2,118
PS1	803174,000	9432675,000	0,34	96,86	2,80	99,66	2,00	1,351
PS2	803140,590	9432692,870	0,21	98,67	1,12	99,79	3,17	0,548
PS3	803451,000	9432758,000	4,25	82,67	13,08	95,75	3,45	2,945
PS4	801714,744	9434761,625	0,32	98,47	1,21	99,68	26,22	1,84
PS5	801708,682	9434765,388	5,32	93,86	0,82	94,68	15,56	3,60
PS6	801721,640	9434757,234	10,98	88,06	0,96	89,02	29,09	0,91
PS7	801483,981	9434760,154	0,00	99,31	0,69	100,00	3,40	0,31
PS8	801340,330	9434480,990	0,00	99,15	0,85	100,00	2,48	0,87
PS9	802580,199	9433025,423	0,00	99,66	0,34	100,00	2,45	1,65
PS10	802570,442	9433021,522	0,00	96,97	3,03	100,00	11,87	3,12
PS11	803434,160	9432372,459	16,79	79,65	3,56	83,21	11,94	2,23
PS12	801143,390	9435161,990	0,06	94,89	5,05	99,94	8,62	2,17
PS13	801313,300	9434469,540	0,00	95,56	4,44	100,00	3,68	1,29
PS14	803182,760	9432663,540	12,79	84,79	2,42	87,21	2,13	1,81
PS15	802123,620	9433034,150	0,00	99,27	0,73	100,00	13,60	3,27
PS16	803361,920	9432321,030	0,00	98,87	1,13	100,00	3,10	1,11
VCGA-02	802556,000	9433956,000	0,00	43,14	56,86	100,00		9,09
VCGA-03B	803047,000	9432682,000	0,00	0,00	100,00	100,00		0,00

C = cascalho, A = areia, L = lama, MO = matéria orgânica

Apêndice 6.3. Mediana, média, selecionamento, assimetria, curtose e classificação das amostras de fundo do sistema Pisa Sal, segundo Vital et al. (2005).

Amostra	Md	Média		Selecionamento		Assimetria		Curtose		Vital et al. (2005)	
	phi	phi	classif.	phi	classificação	phi	classificação	phi	classificação	classificação	
CM1	2,015	1,788	Ar md	1,175	Pobrememente	-0,309	Negativa	1,180	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM2	1,664	1,650	Ar md	1,076	Pobrememente	-0,055	Aprox. simétrica	1,097	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM3	3,579	3,716	Ar mfn	0,899	Moderadamente	0,271	Positiva	3,310	Extremamente leptocúrtica	LL1	Lama terrígena
CM4	3,235	3,117	Ar mfn	0,613	Moderadamente	-0,328	Muito negativa	1,019	Mesocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM5	2,530	1,800	Ar md	1,652	Pobrememente	-0,594	Muito negativa	2,759	Muito leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM6	3,147	3,038	Ar mfn	0,632	Moderadamente	-0,371	Muito negativa	1,253	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM7	3,507	3,507	Ar mfn	0,342	Muito bem	0,065	Aprox. simétrica	0,849	Platicúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM8	1,742	2,024	Ar fn	0,960	Moderadamente	0,277	Positiva	0,923	Mesocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM9	1,218	1,208	Ar md	0,840	Moderadamente	0,073	Aprox. simétrica	0,943	Mesocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM10	1,636	1,819	Ar md	0,819	Moderadamente	0,249	Positiva	1,311	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM11	1,941	2,098	Ar fn	0,912	Moderadamente	0,150	Positiva	0,945	Mesocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM12	1,822	1,346	Ar md	2,009	Muito pobrememente	-0,342	Muito negativa	0,829	Platicúrtica	AL1a	Areia siliciclástica c/ grân. e casc.
CM13	3,337	3,139	Ar mfn	0,639	Moderadamente	-0,595	Muito negativa	3,542	Extremamente leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM14	3,215	3,116	Ar mfn	0,580	Moderadamente	-0,229	Negativa	0,805	Platicúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM15	1,795	1,861	Ar md	0,672	Moderadamente	-0,016	Aprox. simétrica	1,034	Mesocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM16	1,355	1,080	Ar md	1,587	Pobrememente	-0,323	Muito negativa	1,756	Muito leptocúrtica	AL1a	Areia siliciclástica c/ grân. e casc.
CM17	2,757	1,912	Ar md	1,759	Pobrememente	-0,634	Muito negativa	1,385	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM18	1,655	1,808	Ar md	0,750	Moderadamente	0,233	Positiva	1,354	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM19	3,006	2,995	Ar mfn	0,596	Moderadamente	-0,024	Aprox. simétrica	0,738	Platicúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM20	3,141	3,060	Ar mfn	0,606	Moderadamente	-0,174	Negativa	0,761	Platicúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM21	1,777	1,803	Ar md	0,916	Moderadamente	-0,008	Simétrica	1,116	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM22	2,623	2,700	Ar fn	0,636	Moderadamente	-0,228	Negativa	2,763	Muito leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM23	2,574	2,044	Ar fn	1,395	Pobrememente	-0,594	Muito negativa	3,492	Extremamente leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM24	1,549	1,677	Ar md	0,897	Moderadamente	0,132	Positiva	1,802	Muito leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM25	2,962	2,971	Ar fn	0,594	Moderadamente	0,020	Simétrica	0,738	Platicúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM26	1,941	1,896	Ar md	1,392	Pobrememente	-0,332	Muito negativa	1,920	Muito leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM27	3,152	3,064	Ar fn	0,630	Moderadamente	-0,292	Negativa	1,046	Mesocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
CM28	3,528	3,528	Ar mfn	0,727	Moderadamente	-0,045	Aprox. simétrica	3,636	Extremamente leptocúrtica	LL1	Lama terrígena
E1	0,703	0,452	Ar gr	1,025	Pobrememente	-0,230	Negativa	0,743	Platicúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
E2	0,918	0,946	Ar gr	0,407	Bem	0,112	Positiva	1,110	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
E3	0,113	-0,038	Ar mgr	0,736	Moderadamente	-0,262	Negativa	0,762	Platicúrtica	AL1a	Areia siliciclástica c/ grân. e casc.

Md= mediana

Apêndice 6.3. Continuação.

Amostra	Md	Média		Selecionamento		Assimetria		Curtose		Vital et al. (2005)	
	phi	phi	classif.	phi	classificação	phi	classificação	phi	classificação	classificação	
PS1	1,385	1,481	Ar med	0,784	Moderadamente	0,288	Positiva	1,088	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
PS2	1,307	1,335	Ar med	0,622	Moderadamente	0,194	Positiva	1,044	Mesocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
PS3	1,639	2,056	Ar fn	1,404	Pobrememente	0,314	Muito positiva	0,974	Mesocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
PS4	1,044	1,229	Ar md	0,737	Moderadamente	0,385	Muito positiva	1,404	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
PS5	0,451	0,425	Ar gr	0,974	Moderadamente	0,075	Aprox. simétrica	1,191	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
PS6	0,364	0,242	Ar gr	0,959	Moderadamente	-0,040	Aprox. simétrica	1,214	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
PS7	1,028	1,102	Ar md	0,529	Moderadamente	0,346	Muito positiva	1,194	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
PS8	1,083	1,165	Ar md	0,564	Moderadamente	0,330	Muito positiva	1,171	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
PS9	0,710	0,705	Ar gr	0,413	Bem	0,026	Aprox. simétrica	1,088	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
PS10	1,338	1,396	Ar md	0,736	Moderadamente	0,283	Positiva	1,240	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
PS11	1,318	0,763	Ar gr	1,577	Pobrememente	-0,474	Muito negativa	2,059	Muito leptocúrtica	AL1a	Areia siliciclástica c/ grân e csc
PS12	2,035	1,980	Ar md	0,996	Moderadamente	0,039	Aprox. simétrica	0,935	Mesocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
PS13	1,637	1,655	Ar md	0,832	Moderadamente	0,191	Positiva	1,248	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
PS14	0,933	1,010	Ar md	1,145	Pobrememente	-0,038	Aprox. simétrica	1,560	Muito leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
PS15	1,126	1,185	Ar md	0,543	Moderadamente	0,264	Positiva	1,112	Leptocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
PS16	1,566	1,564	Ar md	0,680	Moderadamente	0,073	Aprox. simétrica	0,967	Mesocúrtica	AL1b	Areia siliciclástica
VCGA-02	4,143	4,296	S mgr	1,037	Pobrememente	0,320	Muito positiva	1,200	Leptocúrtica	LL1	Lama terrígena
VCGA-03B	7,447	7,352	S fn	1,440	Pobrememente	0,200	Positiva	1,000	Mesocúrtica	LL1	Lama terrígena

Md= mediana

Apêndice 9.1. Concentração mensal e concentração média no inverno e verão de sólidos em suspensão (SS) em amostras de água superficial nas estações E1 e E3.

Mêses	E1			E3		
	Mês	iv (med)	vr (med)	Mês	iv (med)	vr (med)
	mg/l			mg/l		
jun-04	20,0	6,11	13,53	12,0	6,56	5,72
jul-04	20,0			9,0		
ago-04	20,0			10,5		
set-04	20,0			9,8		
out-04	15,0			23,0		
nov-04	26,0			2,0		
dez-04	4,0			4,0		
jan-05	5,0			7,0		
fev-05	15,0			3,0		
mar-05	4,0			3,0		
abr-05	3,0			8,0		
mai-05	3,0			9,0		
jun-05	7,0			6,0		
jul-05	21,0			1,0		
ago-05	7,0			4,0		
set-05	22,0			2,0		
out-05	4,0			2,0		
nov-05	8,0			7,0		
dez-05	17,0			4,0		
jan-06	8,0			3,0		
fev-06	14,0			4,0		
mar-06	3,0			10,0		
abr-06	3,0			5,0		
mai-06	6,0			3,0		
jun-06	6,0			3,0		
ago-06	4,0			2,0		
Média	11,0			6,0		

iv (inverno) e vr (verão).

Apêndice 10.1. Dados da atividade do ^{210}Pb , cálculos da idade em função da profundidade e taxa de sedimentação do testemunho TUGA-02 (Dibbern, 2007).

Prof. (z)	DBD	Atividade Total ^{210}Pb	Erro ^{210}Pb	Atividade Média ^{210}Pb suportad	Atividade ^{210}Pb não suportad	Atividade ^{210}Pb não suportad	Atividade ^{210}Pb não suportad	Inventário (I _z)	Inventário acumulado (I ₀)	Idade da amostra (t)	Δt (t ₂ – t ₁)	TS
cm	g/cm ³	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	dpm/kg	dpm/g	$^{210}\text{Pb} \cdot \text{DBD} \cdot e$ dpm/cm ²	dpm/ cm ²	ano	ano	cm/ano
0	*	75,42	1,76	12,69	62,73	1,05	0,001046	-	-	-	-	-
2	0,671	105,80	3,76	12,69	93,11	1,55	0,001550	0,0021	0,0311	0,00	0,00	0,00
6	0,766	90,37	2,72	12,69	77,68	1,29	0,001295	0,0040	0,0289	2,36	2,36	1,70
10	0,646	74,60	3,14	12,69	61,91	1,03	0,001032	0,0027	0,0249	7,15	4,79	0,84
14	0,686	85,05	2,57	12,69	72,36	1,21	0,001206	0,0033	0,0222	10,84	3,69	1,08
18	0,744	72,92	3,12	12,69	60,23	1,00	0,001004	0,0030	0,0189	16,01	5,17	0,77
20	0,695	64,42	1,51	12,69	51,73	0,86	0,000862	0,0012	0,0159	21,57	5,56	0,36
24	0,574	90,78	3,07	12,69	78,09	1,30	0,001301	0,0030	0,0147	24,10	2,52	1,59
28	1,301	44,33	2,19	12,69	31,64	0,53	0,000527	0,0027	0,0118	31,16	7,07	0,57
32	1,079	52,65	2,03	12,69	39,96	0,67	0,000666	0,0029	0,0090	39,87	8,71	0,46
36	1,338	33,83	1,91	12,69	21,14	0,35	0,000352	0,0019	0,0061	52,38	12,51	0,32
40	1,347	23,85	0,67	12,69	11,16	0,19	0,000186	0,0010	0,0042	64,38	12,00	0,33
46	1,320	20,68	0,84	12,69	7,99	0,13	0,000133	0,0011	0,0032	73,12	8,74	0,69
50	1,202	23,37	1,07	12,69	10,68	0,18	0,000178	0,0009	0,0022	85,17	12,05	0,33
54	1,283	16,93	0,74	12,69	4,24	0,07	0,000071	0,0004	0,0013	102,09	16,92	0,24
58	1,329	17,35	0,80	12,69	4,66	0,08	0,000078	0,0004	0,0010	110,52	8,44	0,47
62	1,492	14,08	0,60	12,69	1,39	0,02	0,000023	0,0001	0,0006	126,95	16,43	0,24
66	1,437	12,91	0,63	12,69	0,22	0,00	0,000004	0,0000	0,0004	139,98	13,04	0,31
70	1,526	16,63	0,87	12,69	3,94	0,07	0,000066	0,0004	0,0004	-	-	-
74	1,433	11,96	0,59	12,69	-0,73	-0,01	-	-	-	-	-	-
78	1,581	11,02	0,59	12,69	-1,67	-0,03	-	-	-	-	-	-
80	1,566	9,52	0,29	12,69	-3,17	-0,05	-	-	-	-	-	-

DBD (*dry bulk density*/ densidade do sedimento a seco) e TS (taxa de sedimentação).

Apêndice 10.2. Dados da atividade do ^{210}Pb , cálculos da idade em função da profundidade e taxa de sedimentação do testemunho TUGA-03B (Dibbern, 2007).

Prof. (z)	DBD	Atividade total ^{210}Pb	Erro ^{210}Pb	Atividade Média ^{210}Pb suportad	Atividade ^{210}Pb não suportad	Atividade ^{210}Pb não suportad	Atividade ^{210}Pb não suportad	Inventário (Iz)	Inventário acumulado (I ₀)	Idade da amostra (t)	Δt (t ₂ - t ₁)	TS
cm	g/cm ³	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	dpm/kg	dpm/g	$^{210}\text{Pb} \cdot \text{DBD} \cdot e$ dpm/cm ²	dpm/ cm ²	ano	ano	cm/ano
0	*	28,73	1,17	10,68	18,05	0,30	0,000301	-	-	-	-	-
2	1,332	41,98	2,10	10,68	31,30	0,52	0,000522	0,0014	0,0215	0,00	0,00	0,00
4	1,375	33,84	1,55	10,68	23,16	0,39	0,000386	0,0011	0,0201	2,17	2,17	0,92
8	1,272	46,84	1,94	10,68	36,16	0,60	0,000603	0,0031	0,0190	3,97	1,81	2,21
12	1,235	43,79	1,85	10,68	33,11	0,55	0,000552	0,0027	0,0160	9,70	5,73	0,70
16	1,268	32,26	1,07	10,68	21,58	0,36	0,000360	0,0018	0,0132	15,69	5,98	0,67
18	1,199	31,00	0,99	10,68	20,32	0,34	0,000339	0,0008	0,0114	20,40	4,71	0,42
20	1,203	28,23	1,22	10,68	17,55	0,29	0,000292	0,0007	0,0106	22,74	2,34	0,85
22	1,196	37,71	1,92	10,68	27,03	0,45	0,000451	0,0011	0,0099	24,94	2,20	0,91
24	1,219	40,88	1,90	10,68	30,20	0,50	0,000503	0,0012	0,0088	28,72	3,79	0,53
28	1,066	34,16	1,09	10,68	23,48	0,39	0,000391	0,0017	0,0076	33,44	4,71	0,85
32	1,060	38,17	1,67	10,68	27,49	0,46	0,000458	0,0019	0,0059	41,58	8,14	0,49
36	1,011	28,25	0,89	10,68	17,57	0,29	0,000293	0,0012	0,0040	54,08	12,50	0,32
40	1,023	16,83	0,82	10,68	6,15	0,10	0,000102	0,0004	0,0028	65,54	11,47	0,35
44	1,468	14,23	0,59	10,68	3,55	0,06	0,000059	0,0003	0,0024	70,50	4,96	0,81
48	1,463	13,35	0,64	10,68	2,67	0,04	0,000045	0,0003	0,0020	76,36	5,86	0,68
52	1,449	21,40	1,16	10,68	10,72	0,18	0,000179	0,0010	0,0018	79,75	3,39	1,18
56	1,175	13,98	0,64	10,68	3,30	0,05	0,000055	0,0003	0,0007	110,12	30,37	0,13
60	1,222	16,24	0,86	10,68	5,56	0,09	0,000093	0,0005	0,0005	120,94	10,82	0,37
64	1,481	10,89	0,51	10,68	0,21	0,00	0,000004	0,0000	0,0000	-	-	-
68	1,487	6,26	0,38	10,68	-	-	-	-	-	-	-	-
72	1,484	7,70	0,49	10,68	-	-	-	-	-	-	-	-
76	1,057	14,04	0,59	10,68	-	-	-	-	-	-	-	-
80	1,145	5,64	0,31	10,68	-	-	-	-	-	-	-	-

DBD (*dry bulk density*/densidade do sedimento a seco) e TS (taxa de sedimentação).