

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E ECOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA



GEANDRÉ CARLOS BONI

**PADRÃO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
DA DESEMBOCADURA DO SISTEMA
ESTUARINO DOS RIOS PIRAQUÊ-AÇU E
PIRAQUÊ-MIRIM, ARACRUZ (ES)**

VITÓRIA
2010

GEANDRÉ CARLOS BONI

**PADRÃO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DA
DESEMBOCADURA DO SISTEMA ESTUARINO DOS RIOS
PIRAQUÊ-AÇU E PIRAQUÊ-MIRIM, ARACRUZ (ES)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Oceanografia, do Departamento de Oceanografia e Ecologia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia. Orientador: Prof. Dr. Alex Cardoso Bastos

VITÓRIA

2010

**PADRÃO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DA
DESEMBOCADURA DO SISTEMA ESTUARINO DOS RIOS PIRAQUÊ-
AÇU E PIRAQUÊ-MIRIM, ARACRUZ (ES)**

por

GEANDRÉ CARLOS BONI

Submetido como requisito parcial para a obtenção do grau de

Oceanógrafo

na

Universidade Federal do Espírito Santo

Dezembro de 2010

© Geandré Carlos Boni

Por meio deste o autor confere ao Colegiado do Curso de Graduação em Oceanografia e ao Departamento de Oceanografia e Ecologia da UFES permissão para reproduzir e distribuir cópias parciais ou totais deste documento de trabalho de conclusão de curso para fins não comerciais.

Assinatura do autor
Curso de Graduação em Oceanografia
Universidade Federal do Espírito Santo
14 de dezembro de 2010

Certificado por
Prof. Dr. Alex Cardoso Bastos
Orientador
DOC/CCHN/UFES

Certificado por
Prof^a. Dra. Jacqueline Albino
Examinador interno
DOC/CCHN/UFES

Certificado por
Prof^a. Dra. Valéria da Silva Quaresma
Examinador interno
DOC/CCHN/UFES

Aceito por
Prof. Dr. Gilberto Fonseca Barroso
Coordenador do Curso de Graduação em Oceanografia
DOC/CCHN/UFES

A Alaci e Odilson, pais, amigos, motivadores, fontes de sabedoria, de fé, de confiança e de inspiração. Meu amor incondicional e eterno.

“Diz-se que, mesmo antes de um rio cair no Oceano ele treme de medo.
Olha para trás, para toda a jornada, os cumes, as montanhas, o longo
caminho sinuoso através das florestas, através dos povoados, e vê à
sua frente um Oceano tão vasto que entrar nele nada mais é do que
desaparecer para sempre. Mas não há outra maneira.
O rio não pode voltar.
Ninguém pode voltar.
Voltar é impossível na existência.
Você pode apenas ir em frente.
O rio precisa se arriscar e entrar no Oceano.
E somente quando ele entra no Oceano é que o medo desaparece
Porque apenas então o rio saberá que não se trata de desaparecer no
Oceano ... mas tornar-se Oceano.”
(Anônimo)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela Vida e pela família linda que me deu.

Aos meus pais, simplesmente por serem quem são.

As minhas irmãs, por cuidarem de mim quando precisei e pelo apoio nos estudos.

Aos meus colegas de repúblicas, pelos momentos de silêncio, e pelas experiências trocadas quando se mora longe dos pais

Aos meus amigos Nikolai, Polyanna, Thiago e Vinícius, por sempre estarem por perto, e ao Planetário de Vitória, por proporcionar este encontro.

Ao tricolor fanático Alex Bastos, por confiar na minha capacidade, pelos momentos de tranquilidade e, pelos conhecimentos transmitidos pacientemente.

A todos os meus professores, pelo conhecimento e visão do mundo passada em suas aulas. Em especial as professoras Valéria Quaresma e Jacqueline Albino, por aceitarem a participação na minha banca, e pela confiança em mim depositada em outros projetos durante a graduação.

A todos os meus colegas de estudos, que me deram suporte e me acompanharam até aqui.

A Agência Nacional do Petróleo (ANP) pela bolsa de pesquisa concedida.

A todos os amigos e familiares não citados que contribuíram para que este momento chegasse.

Agradeço a todos!

RESUMO

O padrão de transporte de sedimentos da desembocadura do Sistema Estuarino dos rios Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim (SEPAPM), em Aracruz (ES) foi estudado a partir do modelo de transporte de sedimentos Sedtrans05. Os dados hidrodinâmicos inseridos no modelo foram obtidos a partir do fundeio de dois ADPs e um ADV. Nestes locais de fundeio foram coletadas amostras de sedimentos, para determinação de uma granulometria de entrada no modelo. As dimensões das formas de fundo foram obtidas por medição direta e, indiretamente, através de mapeamento com Sonar de Varredura Lateral. Antes da aplicação do modelo foi realizada sua calibração, utilizando uma armadilha de sedimentos, do tipo amostrador Helley-Smith, de forma que fosse determinada a equação ideal para a área de estudo. Foram utilizadas 12 amostras *in situ* com a armadilha, relativas a momentos de sizígia e de quadratura da desembocadura. As comparações entre as taxas previstas pelo modelo e aquelas obtidas em campo revelaram uma maior adequabilidade da equação de carga total de Bagnold (Bagnold, 1963). Uma vez calibrado, o modelo foi utilizado para fornecer os vetores de taxa de transporte de sedimentos em três pontos: um no canal de acesso ao SEPAPM (ponto P1) e dois sobre um proeminente banco arenoso da desembocadura (pontos P2 e P3). Nestes pontos foram gerados vetores resultantes de velocidades de correntes e de taxas de transporte. Foi observado um padrão de vetores resultantes de taxas de transporte no sentido da maré vazante da desembocadura, em concordância com a orientação das formas de fundo observadas nos locais de fundeio. Sob condições em que as ondas estavam ausentes no ponto P3, não foi observado transporte de sedimentos. Experimentos de migração mostraram o aumento da taxa de migração com o incremento de profundidade e das dimensões das formas de fundo. Assim como foram observados maiores valores de migração na sizígia quando comparados aos da quadratura. Uma melhor compreensão do padrão de transporte de sedimentos da área de estudo poderia ser obtida com uma investigação em escala espacial maior, que também apresentasse uma cobertura da variação sazonal de suas condições ambientais.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Esquema de classificação recomendado pelo SEPM Bedforms e pelo Bedding Structures Research Symposium. Modificado de Ashley (1990).....	23
Tabela 2: Características dos fundeios dos ADPs e do ADV, e previsões para as marés (DHN, 2010), nos respectivos dias. A altura de medição é relativa à distância a partir do fundo.	37
Tabela 3: Classificação granulométrica de Wentworth (1922), adotada na classificação das amostras de sedimentos submetidas à análise granulométrica.	46
Tabela 4: Classificação em termos de grau de seleção segundo o método de Folk e Ward (1957) original (em Φ) e, segundo aquele modificado pelo <i>GRADSTAT</i> (em μm).	47
Tabela 5: Classificação em termos de simetria, segundo os métodos de Folk e Ward (1957) original (em Φ) e, aquele modificado pelo <i>GRADSTAT</i> (em μm).	47
Tabela 6: As magnitudes (m/s) e o ângulo (graus em relação ao Norte – Rosa dos Ventos) dos vetores resultantes, relativos às correntes medidas nos três fundeios realizados.....	58
Tabela 7: Porcentagem de matéria orgânica (MO) e, massa total (T) e resultante (R – sem material orgânico) (em gramas) das amostras de sedimentos coletadas com o amostrador de carga de fundo, durante a sizígia e a quadratura.....	59
Tabela 8: Comparação entre as taxas de transporte de sedimentos previstas pelo Sedtrans05 e aquelas obtidas <i>in situ</i> , utilizando coeficiente de determinação (R^2). As duas melhores correlações estão destacadas.....	62
Tabela 9: As magnitudes (Kg/s/m) e o ângulo (Rosa dos ventos) dos vetores resultantes de taxas de transporte de sedimentos, nos três fundeios realizados.	69
Tabela 10: Migração (cm) e taxas de migração (cm/h) das formas de fundo, relativos aos experimentos de quadratura e sizígia.....	73

Tabela 11: Comprimentos de onda (m) e alturas (cm) das formas de fundo utilizadas nos experimentos de estimativa das taxas de migração das formas de fundo, os primeiros correspondendo às distâncias relativas entre os vergalhões utilizados.	73
Tabela 12: Parâmetros estatísticos (em μm ; média em mm) segundo o método de Folk e Ward (1957), modificado pelo software <i>GRADSTAT</i> , relacionados ao peneiramento das amostras de sedimentos das formas de fundo do experimento de migração. Porcentagens de CaCO_3 , e abreviação da classificação dos sedimentos marinhos, segundo Larsonneur (1977, modificado por Dias, 1996). CRI – crista. CAV – cava.....	75
Tabela 13: Parâmetros estatísticos (em μm ; média em mm) segundo o método de Folk e Ward (1957), modificado pelo software <i>GRADSTAT</i> , relacionados ao peneiramento das amostras de sedimentos no local de fundeio do ADV <i>Triton</i> , para os momentos de sizígia e de quadratura. Porcentagens de CaCO_3 , e abreviação da classificação dos sedimentos marinhos segundo Larsonneur (1977, modificado por Dias, 1996). CRI – crista. CAV – cava.	77
Tabela 14: Parâmetros estatísticos (em μm ; média em mm) segundo o método de Folk e Ward (1957), modificado pelo software <i>GRADSTAT</i> , relacionados ao peneiramento das amostras de sedimentos nos locais de fundeio dos ADPs <i>Aquadopp</i> e <i>Argonaut</i> . Porcentagens de CaCO_3 , e abreviação da classificação dos sedimentos marinhos segundo Larsonneur (1977, modificado por Dias, 1996).....	79

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: SEPAPM, localizado no Município de Aracruz (destaque). Sua desembocadura apresenta orientação aproximada Leste – Oeste.FONTE: Fotografias aéreas fornecidas pelo professor Dr. Alex Cardoso Bastos..... 16
- Figura 2: Batimetria do SEPAPM (Modificado de Silva *et al.*, 2010). 17
- Figura 3: Mapa geológico correspondente à região de Santa Cruz (ES). Modificado de Martin *et al.* (1996). 19
- Figura 4: Mapa faciológico do SEPAPM, segundo a classificação proposta por Folk (1954). Modificado de Silva *et al.* (2010). 20
- Figura 5: Mapa Faciológico da plataforma continental, entre as praias de Bicanga (Serra) e de Povoação (Linhares), ao norte da desembocadura do rio Doce (Modificado de Albino, 1999). 21
- Figura 6: Gráfico de altura (H) e espaçamento (L), ambos em logaritmo, de 1491 formas de fundo subaquosas transversas ao escoamento (Flemming, 1988). 24
- Figura 7: Gráfico logarítmico de "wind ripples" (círculos) e dunas eólicas (quadrados) e a regressão sendo comparada com aquela relativa à Figura 6 (linha pontilhada). Modificado de Lancaster (1988) por Ashley (1990). 25
- Figura 8: Pequenas dunas 2D (A, foto por R.W. Dalrymple) e 3D (B, foto por T. Elliott), ambas com espaçamento de 5 m. Modificado de Ashley (1990). 26
- Figura 9: Diagrama profundidade e velocidade do escoamento para dunas de areias médias a grossas, em flumes e sob correntes de maré profundas. Modificado de Ashley (1990). 27
- Figura 10: (a) Esquema dos processos de deslocamento do sedimento marinho e, (b) do plano normal ao escoamento, para definição da taxa de transporte sedimentar. Modificado de Soulsby (1997). 28
- Figura 11: Localização dos pontos de fundeio dos ADPs *Aquadopp* (P1) e *Argonaut* (P2), e do ADV *Triton* (P3), na desembocadura do SEPAPM. FONTE: Fotografias aéreas fornecidas pelo professor Dr. Alex Cardoso Bastos. 36

Figura 12: Perfiladores de velocidade, em suas estruturas de sustentação para fundeios. (a) <i>Sontek XR Argonaut</i> . (b) <i>Nortek AS Aquadopp</i>	39
Figura 13: ADV <i>Sontek Triton</i> em seu local de fundeio. Ao fundo, a praia estuarina utilizada nos campos realizados sobre o banco arenoso.	39
Figura 14: Equipamento amostrador de carga de fundo, do tipo Helley-Smith.....	40
Figura 15: Detalhe dos fragmentos da folhagem (em preto) da vegetação da praia estuarina.....	41
Figura 16: Experimento para estimar as taxas de migração das formas de fundo, realizado no dia 21/07/2010 (Quadratura). Observar os quatro vergalhões de referência para as medições.....	43
Figura 17: (a) Transdutor ou peixe <i>272TD</i> , emissor e receptor do pulso sonoro; (b) processador (caixa amarela) conectado a um laptop com o software de aquisição dos dados <i>Discover 4100</i> instalado.....	44
Figura 18: Classificação de sedimentos marinhos de Larssonneur (1977, modificada por Dias, 1996). Md = mediana; L = lama; c = coquina (>20 mm); s. = seixos (4 a 65 mm); g = grânulos (2 a 4mm) r = rodolitos (nódulos de algas calcáreas)..	48
Figura 19: Magnitude (m/s) (a) e sentido (graus a partir do Norte - Rosa dos Ventos) (b) dos vetores de velocidade de corrente, relativos ao local de fundeio do <i>Aquadopp</i> (Ponto P1 da Figura 11).	51
Figura 20: Magnitude (m/s) (a) e sentido (graus a partir do Norte - Rosa dos Ventos) (b) dos vetores de velocidade de corrente, relativos ao local de fundeio do <i>Argonaut</i> (Ponto P2 da Figura 11).	53
Figura 21: Magnitude (m/s) (a) e sentido (graus a partir do Norte - Rosa dos Ventos) (b) dos vetores de velocidade de corrente, relativos ao local de fundeio do <i>Triton</i> (Ponto P3 da Figura 11).	56
Figura 22: Gráficos comparativos entre as taxas de transporte medidas <i>in situ</i> (com a massa total da amostra) e as taxas previstas pelo modelo Sedtrans05. Os cálculos foram feitos utilizando ou a média (coluna à esquerda) ou o D50 (coluna à direita). (a & f) Equação de carga total de Engelund-Hansen; (b & g) Equação de carga de fundo de Einstein-Brown; (c & h) Equação de carga total	

de Bagnold; (d & i) Equação de carga de fundo de Yalin; (e & j) Equação de carga de fundo de van Rijn.	60
Figura 23: Gráficos comparativos entre as taxas de transporte medidas <i>in situ</i> (com a massa resultante da amostra) e as taxas previstas pelo modelo Sedtrans05. Os cálculos foram feitos utilizando ou a média (coluna à esquerda) ou o D50 (coluna à direita). (a & f) Equação de carga total de Engelund-Hansen; (b & g) Equação de carga de fundo de Einstein-Brown; (c & h) Equação de carga total de Bagnold; (d & i) Equação de carga de fundo de Yalin; (e & j) Equação de carga de fundo de van Rijn.	62
Figura 24: Magnitude (Kg/s/m) (a) e sentido (graus a partir do Norte - Rosa dos Ventos) (b) dos vetores de taxa de transporte de sedimentos, relativos ao local de fundeio do <i>Aquadopp</i> (Ponto P1 da Figura 11).....	64
Figura 25: Magnitude (Kg/s/m) (a) e sentido (graus a partir do Norte - Rosa dos Ventos) (b) dos vetores de taxa de transporte de sedimentos, relativos ao local de fundeio do <i>Argonaut</i> (Ponto P2 da Figura 11).....	66
Figura 26: Magnitude (Kg/s/m) (a) e sentido (graus a partir do Norte - Rosa dos Ventos) (b) dos vetores de taxa de transporte de sedimentos, relativos ao local de fundeio do <i>Triton</i> (Ponto P3 da Figura 11).....	68
Figura 27: Magnitude e sentido dos vetores resultantes de taxas de transporte de sedimentos. As magnitudes são proporcionais ao menor valor (P2).....	69
Figura 28: (A) Padrão de escoamento sobre uma ripple. Distribuição de velocidade, separação do escoamento, e as três principais zonas: sem difusão, de mistura, e de escoamento contrário. (B) Padrão de escoamento e processos de sedimentação sobre uma ripple. Os grãos se acumulam e formam uma protuberância na crista, a partir da qual ocorrem avalanches de sedimentos para a cava (Modificado de Reineck e Singh, 1980).	76
Figura 29: Mosaico sonográfico da desembocadura do SEPAPM. Detalhe: formas de fundo próximas ao local de fundeio do <i>Aquadopp</i> (P1). Cores claras remetem à baixa Intensidade de Retorno do Sinal (IRS).....	80

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVAS.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos	15
2 ÁREA DE ESTUDO	16
2.1 ASPECTOS GERAIS.....	16
2.2 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA E OCEANOGRÁFICA	17
2.3 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 FORMAS DE FUNDO.....	22
3.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	27
3.3 MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS: Sedtrans05.....	29
3.3.1 Equação de transporte de carga total de Engelund–Hansen	32
3.3.2 Equação de transporte de carga de fundo de Einstein–Brown	32
3.3.3 Equação de transporte de carga total de Bagnold	32
3.3.4 Equação de transporte de carga de fundo de Yalin	33
3.3.5 Equação de transporte de carga de fundo de van Rijn	34
3.4 BANCOS ARENOSOS	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1 PROCEDIMENTO DE CAMPO	35
4.1.1 Hidrodinâmica e Transporte de Sedimentos	35
4.1.2 Calibração do Modelo de Transporte de Sedimentos Sedtrans05.	39
4.1.3 Geometria e migração das formas de fundo	41

4.2 ANÁLISE LABORATORIAL	45
4.2.1 Tratamento das amostras de sedimentos	45
4.2.2 Análise granulométrica.....	45
4.2.3 Análise do teor de Carbonato de Cálcio (CaCO ₃)	47
4.2.4 Assimetrias temporal e de velocidade das correntes	48
4.2.5 Calibração do modelo e cálculo das taxas de transporte de sedimentos..	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
5.1 HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	50
5.1.1 Assimetrias Temporal e de Velocidades das Correntes.....	50
5.1.1.1 Dados do fundeio no canal (ADP - Aquadopp)	50
5.1.1.2 Dados do fundeio sobre o banco arenoso (ADP - Argonaut).....	52
5.1.1.3 Dados do fundeio sobre o banco arenoso (ADV)	55
5.1.2 Calibração do Modelo de Transporte de Sedimentos Sedtrans05.	58
5.1.3 Taxas de Transporte de Sedimentos na Desembocadura do SEPAPM ...	63
5.1.3.1 Local de Fundeio do Aquadopp	63
5.1.3.2 Local de Fundeio do Argonaut	65
5.1.3.3 Local de Fundeio do Triton	66
5.2 TAXAS DE MIGRAÇÃO E GEOMETRIA DAS FORMAS DE FUNDO.....	72
5.2.1 Estimativa das taxas de migração de formas de fundo sobre o banco arenoso	72
5.2.2 Geometria das Formas de Fundo da Desembocadura do SEPAPM.	76
5.3 ANÁLISE INTEGRADA.....	81
6 CONCLUSÕES.....	84
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVAS

As zonas costeiras representam ambientes transitórios entre continentes e oceanos. E associado à sua diversidade de ambientes (deltas, estuários, praias, recifes, falésias, promontórios rochosos e, etc.), com suas diferentes vulnerabilidades, têm-se observado ao longo dos anos sua ocupação e, utilização de recursos naturais pelo homem, ocorrendo em sua maioria sem o devido planejamento. No caso do estado do Espírito Santo, Albino *et al.* (2006) observaram tendências naturais erosivas e/ou construtivas ao longo do litoral, e destacou a importância de sua consideração e compreensão anteriormente a qualquer forma de ocupação.

Os ambientes estuarinos correspondem a uma região de interface entre suas bacias hidrográficas e a zona costeira adjacente. Dentre outros fatores, sua elevada produtividade biológica e hidrodinâmica relativamente calma, têm contribuído para seus diversos tipos de usos: comercial (pesca, navegação, construção de portos e marinas, aquicultura), turístico, habitacional, científico, dentre outros. Há de se ressaltar a natureza geomorfológica recente dos estuários, dentro dos ambientes costeiros. Cujas formações estão associadas a última glaciação (à cerca de 18.000 anos AP) e, portanto, à consequente elevação do nível médio do mar (Dyer, 1997). Dentre outras variáveis, a análise de sua estabilidade deve levar em consideração estas variações, e o balanço entre as taxas de sedimentação associadas aos escoamentos marinho e fluvial.

Os estuários podem receber aportes de rios oriundos de diversas bacias hidrográficas, em vários pontos da região estuarina, assim como, possuir mais de uma ligação com o mar. Desta maneira, os ambientes costeiros com aporte de vários rios podem ser denominados sistemas estuarinos (Miranda *et al.*, 2002).

Os bancos arenosos costeiros contribuem para a estabilização de praias adjacentes, atuando como provedor de sedimentos. As dissipações de ondas ao seu redor por refração os tornam cruciais para a manutenção da forma da linha de costa e, para a proteção contra erosão sob tempestades. Adicionalmente, os bancos são considerados perigosos à navegação e, podem conter reservas exploráveis de areia

e cascalho. Estas regiões têm grande contribuição para a saúde da indústria pesqueira, uma vez que os bancos são locais de reprodução e alimentação para muitas espécies de peixes. Do ponto de vista geológico, os bancos arenosos são considerados reservatórios potenciais de óleo e gás (Dyer e Huntley, 1999).

A partir deste contexto, somado ao fato de que a maioria da população mundial vive próxima e/ou habita a região costeira, observa-se a necessidade do entendimento dos processos hidrodinâmicos e sedimentológicos que ocorrem nestes ambientes. Para tanto, este estudo visa contribuir através da análise do padrão de transporte de sedimentos da desembocadura do Sistema Estuarino dos rios Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim (SEPAPM), Aracruz (ES).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

- O objetivo deste trabalho é analisar o padrão de transporte de sedimentos da desembocadura do SEPAPM e a sua relação com o banco arenoso adjacente.

1.2.2 Objetivos específicos

- Calcular as taxas de transporte de sedimentos em três locais distintos da desembocadura do SEPAPM;
- Analisar o padrão de assimetria temporal e de velocidades das correntes de maré nestes três pontos, e sua influência no padrão de transporte;
- Estimar taxas de migração de formas de fundo.

2 ÁREA DE ESTUDO

2.1 ASPECTOS GERAIS

O sistema estuarino dos rios Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim (SEPAPM) localiza-se no distrito de Santa Cruz, pertencente ao município de Aracruz, 83 Km ao norte da capital do estado do Espírito Santo, Vitória (Figura 1). O SEPAPM possui dois afluentes, os rios Piraquê-Açu (braço norte) e Piraquê-Mirim (braço sul), com áreas de drenagem aproximadas de 376 Km² e 69 Km², respectivamente (Barroso, 2004).

Este sistema apresenta um formato em “Y”, sendo que sua desembocadura está orientada em uma direção aproximada Leste-Oeste (L-O). Nesta figura, pode-se observar a localização do banco arenoso, na porção final da desembocadura.

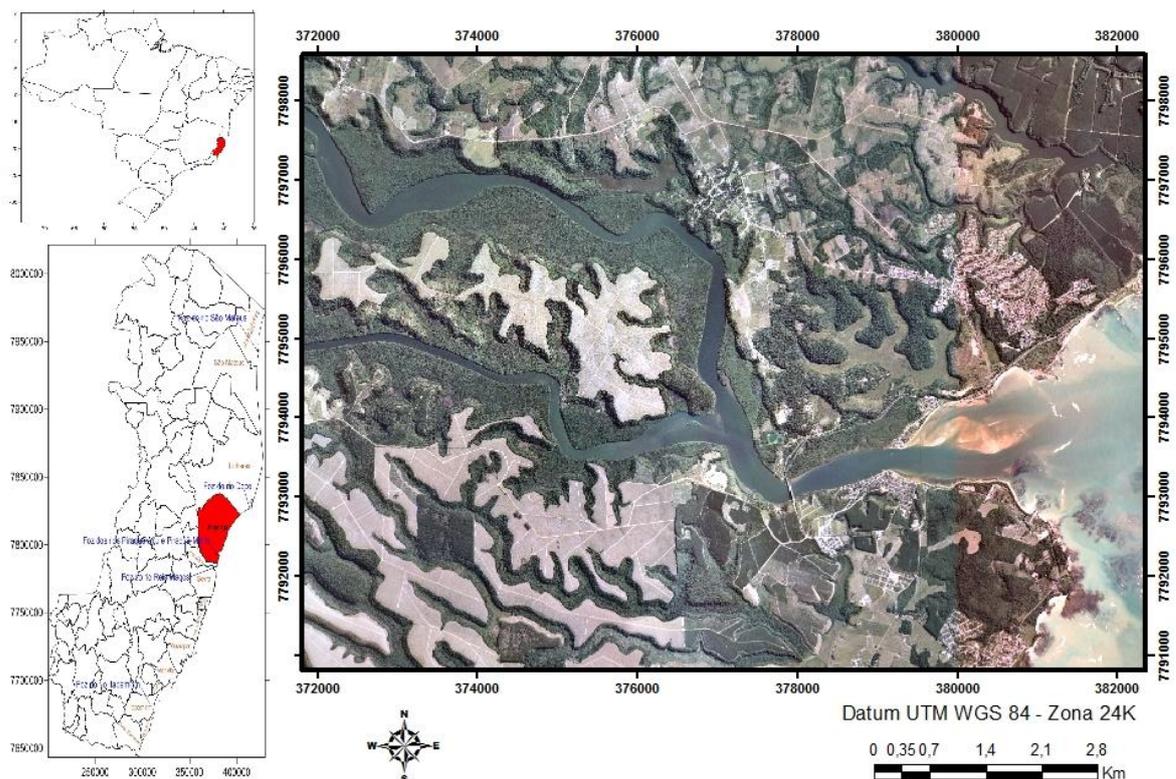


Figura 1: SEPAPM, localizado no Município de Aracruz (destaque). Sua desembocadura apresenta orientação aproximada Leste – Oeste. FONTE: Fotografias aéreas fornecidas pelo professor Dr. Alex Cardoso Bastos.

A Figura 2 apresenta a batimetria do SEPAPM, confeccionada por Silva *et al.* (2010), indicando que na desembocadura o canal de acesso ao sistema estuarino apresenta profundidades variáveis entre seis e um metro de profundidade.

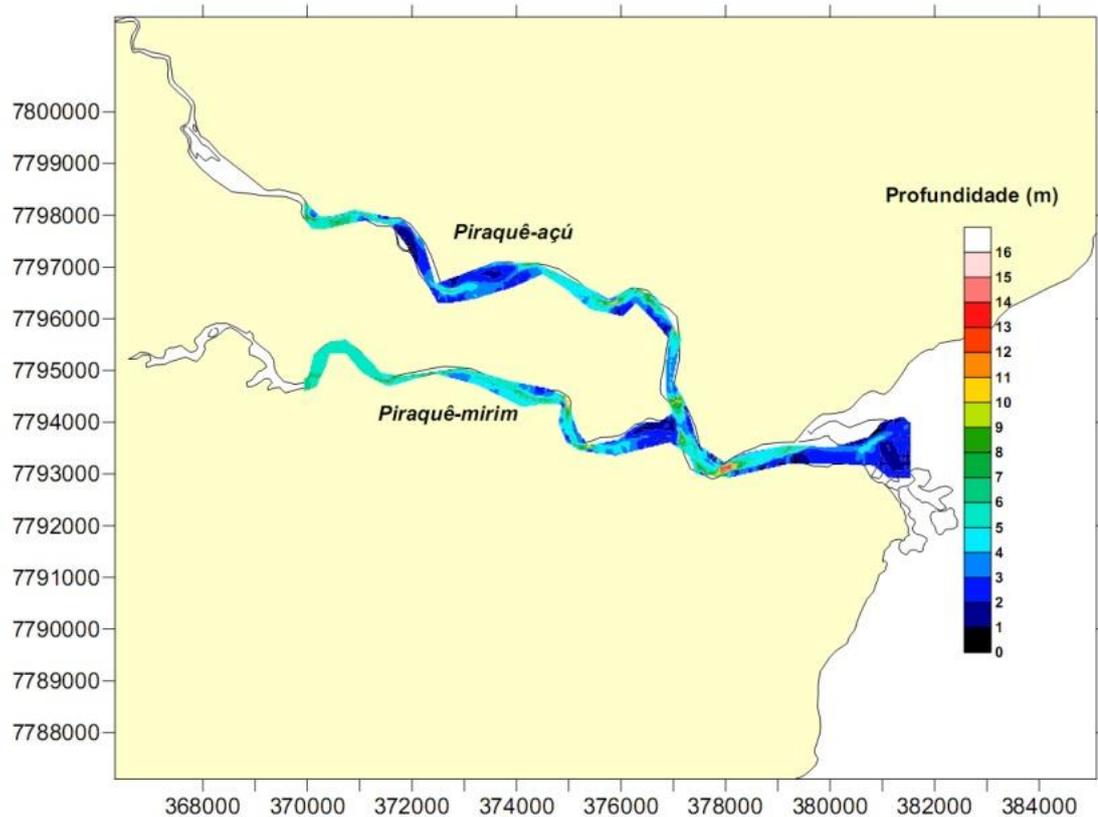


Figura 2: Batimetria do SEPAPM (Modificado de Silva *et al.*, 2010).

2.2 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA E OCEANOGRÁFICA

Albino *et al.* (2006) citam levantamentos relacionados à Bandeira *et al.* (1975) e a EMCAPA (1981), e concluem que os ventos mais freqüentes e mais intensos na costa capixaba são aqueles provenientes dos quadrantes NE-ENE e SE, respectivamente. Estes primeiros estariam relacionados aos ventos alísios, presentes durante a maior parte do ano, enquanto os ventos mais intensos relacionam-se às frentes frias que alcançam periodicamente a costa espírito santense.

Davies (1964) propôs o seguinte esquema para caracterizar as linhas de costa, quanto às variações da altura máxima da maré ($H_{MÁX}$): micromaré ($H_{MÁX} < 2$ m), mesomaré ($2 < H_{MÁX} < 4$ m), macromaré ($4 < H_{MÁX} < 6$ m) e, hipermaré ($H_{MÁX} > 6$ m). O

mesmo autor relata que as variações da maré e das velocidades de correntes de maré, ao longo da linha de costa, estão associadas à largura da plataforma e, com a conseqüente intensidade de ação das ondas. A análise de tábuas de marés (DHN, 2010) permite enquadrar a costa capixaba dentro de um regime de micromaré, do tipo semidiurna, sendo a componente harmônica principal a semidiurna lunar (M2).

De acordo com Bandeira *et al.* (1975) dados referentes à planície deltaica do rio Doce indicam que os principais setores de origem das ondas são NE-E e SE-E, com predomínio do primeiro. Observa-se uma correlação com os sistemas de ventos anteriormente citados, uma vez que o setor sul gera as ondas menos freqüentes, porém mais energéticas que àquelas oriundas do quadrante NE, estando associadas à entrada de frente frias. Martin *et al.* (1993) destacam que durante o Fenômeno *El Niño*, ocorre o bloqueio das zonas frontais pelo jato atmosférico subtropical, uma vez que este é intensificado e se torna permanente; neste contexto, as ondas do setor sul podem não atingir o litoral capixaba, de forma que as frentes de ondas sejam originadas principalmente pelos ventos de NE-E.

2.3 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

Albino (1999) e Suguio (1999) enfatizam que o período Quaternário é caracterizado pela oscilação do nível médio do mar, ao longo de toda a costa brasileira, cujo reflexo é a formação de: planícies litorâneas arenosas, com estuários e/ou lagunas associados; falésias associadas aos tabuleiros da Formação Barreiras; lagunas; depressões alagadas, localizadas entre cordões arenosos e; os arenitos de praia, ou “beachrocks”. No caso do estado do Espírito Santo, este apresenta 14 estuários, em sua maioria associados às planícies costeiras, com formação relacionada a última elevação do nível do mar, e o conseqüente afogamento de seus respectivos vales de rios. Sendo que, segundo Suguio *et al.* (1985), a foz do rio Doce está associada a um sistema deltaico.

Martin *et al.* (1996) realizaram uma subdivisão fisiográfica da costa do Espírito Santo de acordo com a interação e distribuição do Embasamento Cristalino Pré-Cambriano, dos Tabuleiros da Formação Terciária Barreiras e, das Planícies Costeiras Quaternárias. Como resultado, os autores dividiram a costa capixaba em cinco setores, sendo que a área de estudo está inserida no “Setor 3”, que se

estende de Barra do Riacho a entrada da Baía de Vitória (Figura 3). Nesta região os depósitos Quaternários são relativamente pouco desenvolvidos, estando confinados às bases das falésias da Formação Barreiras. A presença destes depósitos é mais notável ao longo dos vales dos rios Piraquê-Açu, Piraquê-Mirim e Reis Magos, sendo que este se localiza mais ao sul, e não foi coberto pela Figura 3.

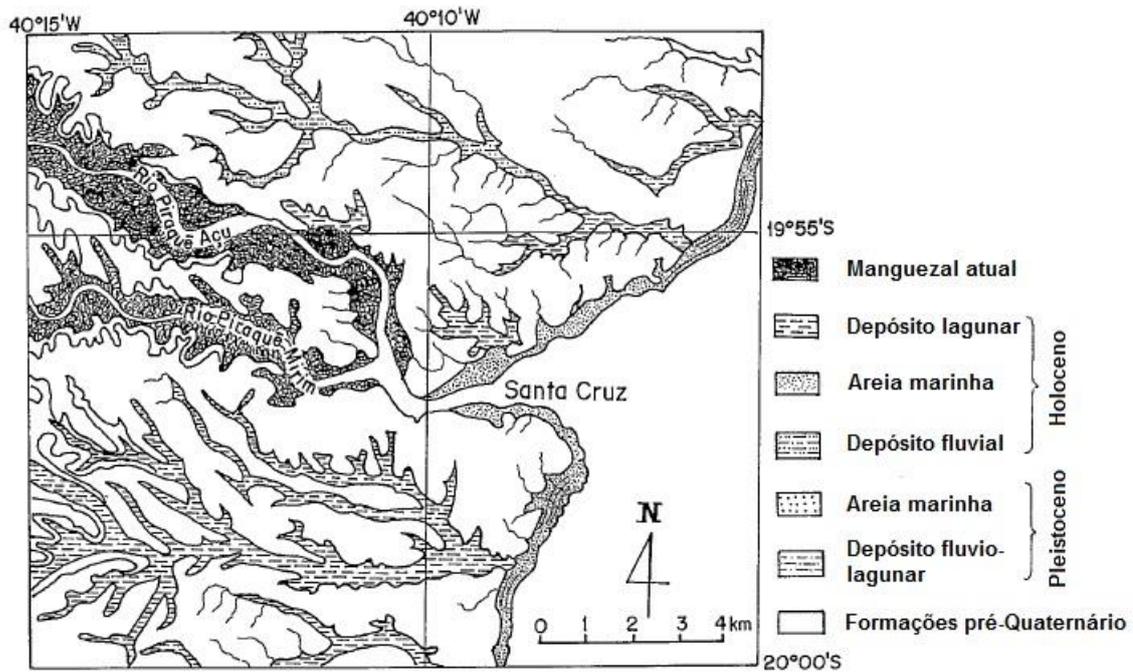


Figura 3: Mapa geológico correspondente à região de Santa Cruz (ES). Modificado de Martin *et al.* (1996).

Silva *et al.* (2010) elaboraram um mapa com a faciologia do SEPAPM, revelando a classificação textural de seus sedimentos segundo o método de Folk (1954) (Figura 4).

Segundo os macros compartimentos costeiros de Muehe (1998), o litoral do Espírito Santo está inserido no litoral Oriental; abrangendo o Embaiamento de Tubarão (entre os rios Itabapoana e Doce) e a parte sul do banco de Abrolhos (do rio Doce até a divisa com o estado da Bahia). Na área de estudo, a plataforma continental interna segue um arco com curvatura suave (do Norte para o Sul), relativo ao Embaiamento de Tubarão, em concordância com a tendência da plataforma continental. Após um lento estreitamento, ao largo de Vitória ela atinge a menor largura de 27 Km, até a isóbata de 50 m.

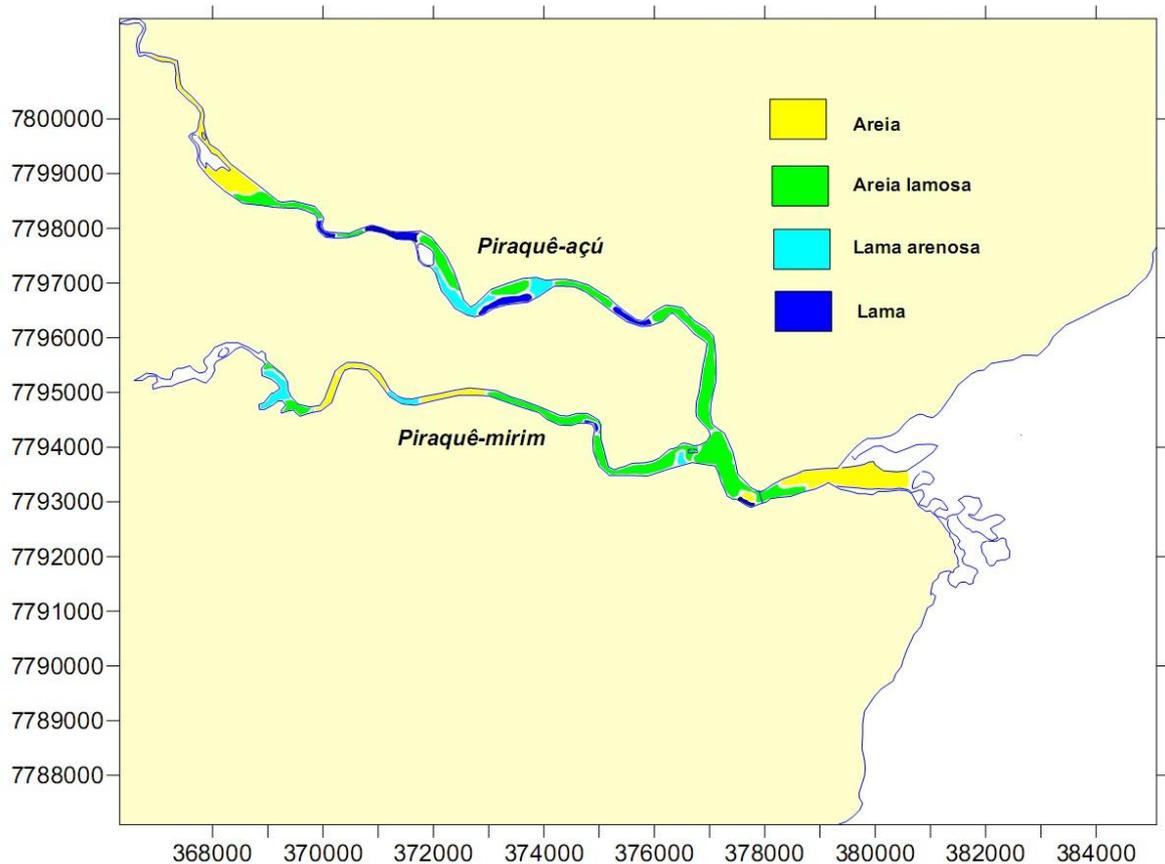


Figura 4: Mapa faciológico do SEPAPM, segundo a classificação proposta por Folk (1954). Modificado de Silva *et al.* (2010).

O recobrimento sedimentar da plataforma é mostrado na Figura 5, onde se observa o mapa faciológico de Albino (1999). Segundo a autora, os sedimentos siliciclásticos (litoclásticos) predominam próximo às desembocaduras dos rios Doce (Linhares) e Reis Magos (Serra), indicando a importância local destes aportes continentais. Também se pode observar uma considerável abrangência dos sedimentos mistos por quase todo o litoral, como resultado de uma contribuição mista de sedimentos marinhos e terrígenos. Enquanto a plataforma interna adjacente à desembocadura do SEPAPM apresenta um considerável predomínio de sedimentos bioclásticos, de granulometrias grossas.

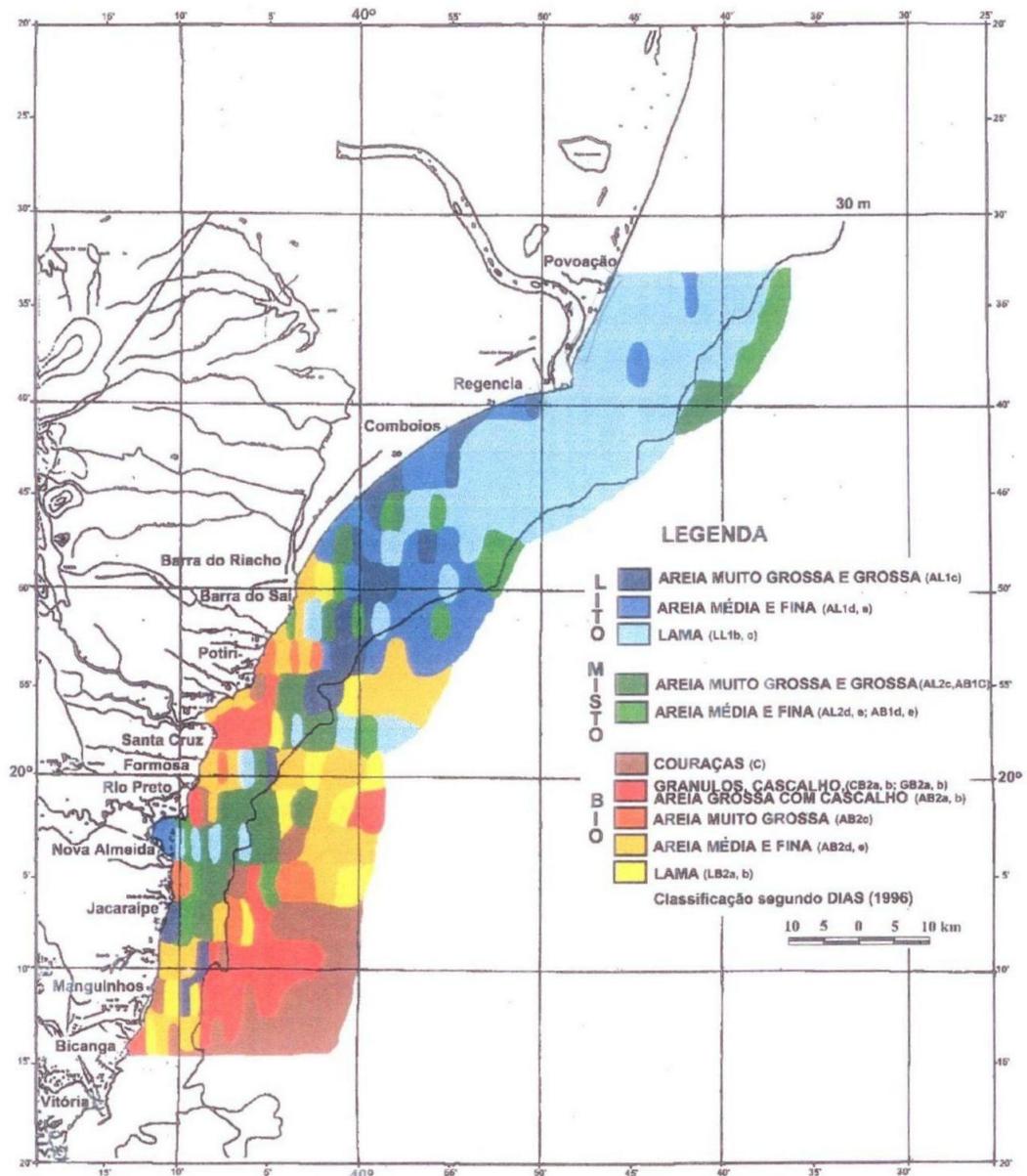


Figura 5: Mapa Faciológico da plataforma continental, entre as praias de Bicanga (Serra) e de Povoação (Linhares), ao norte da desembocadura do rio Doce (Modificado de Albino, 1999).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 FORMAS DE FUNDO

As formas de fundo são feições de relevo, associadas ao escoamento de um fluido, sendo desenvolvidas como consequência de uma interação instável, envolvendo o escoamento e o material do fundo (Allen, 1968). Harris e Collins (1985) destacam que as formas de fundo praticamente não se desenvolvem em depósitos lamosos, sendo que elas podem ocorrer mais comumente associadas a sedimentos areno-lamosos, arenosos e/ou cascalhos-arenosos. Contudo, alguns experimentos em flumes realizados por Jopling e Forbes (1979) demonstraram o desenvolvimento de pequenas ripples em sedimentos com granulometria semelhante à silte.

As formas de fundo são caracterizadas pela uniformidade de tamanho e espaçamento, sob determinadas condições. Outro fator interessante é sua disposição em relação ao escoamento. Sendo que as formas de fundo dispostas de maneira transversal são denominadas transversas, enquanto as formas de fundo com espaçamento paralelo ao escoamento são denominadas longitudinais (Allen, 1968).

Boothroyd (1985) adotou uma classificação baseada no espaçamento ou comprimento de onda das formas de fundo, a qual categoriza as formas de fundo em três escalas: “ripples”, com espaçamento inferior a 0,6 m; “megaripples”, entre 0,6 e 10 m; e “sandwaves”, cujo espaçamento seria superior a 6 m. Alguns trabalhos não fazem distinção entre os dois últimos tipos de formas de fundo, agrupando-os com os nomes de ripples de larga escala, ou dunas (por exemplo: Allen 1968, 1982; Harms *et al.*, 1982). Com o objetivo de padronizar uma nomenclatura para as formas de fundo de larga escala (com exceção das antidunas), Ashley (1990) agrupou-as segundo a Tabela 1. Os espaçamentos foram delimitados como múltiplos de cinco, de forma a facilitar a memorização. Enquanto as alturas (H) foram calculadas a partir da equação de Flemming (1988), $H = 0,0677 L^{0,8098}$, em que L refere-se ao espaçamento entre as dunas. Este autor realizou 1491 medições de formas de fundo marinhas subaquosas, sob influencia de escoamentos uni e bidirecionais, desde regiões rasas (<1 m) a mais profundas (<50 m). O gráfico de altura *versus*

espaçamento destas amostragens (Figura 6) indica uma nítida divisão entre as ripples (formas pequenas) e as dunas (formas maiores).

A partir de um consenso entre os demais participantes do simpósio que originou sua publicação, Ashley (1990) utilizou esse padrão para indicar que as grandes formas de fundo ocorrem como uma continuidade de tamanhos, não como grupos discretos. E que a variedade de morfologias destas reflete uma resposta às condições ambientais, como canalizações, flutuações de nível da água e, das intensidades e direções das correntes. Segundo Klein (1985), observa-se que sobre os corpos arenosos desenvolvem-se tanto *current ripples*, como as dunas, sendo que as primeiras estão associadas à ambientes com pouquíssima influência de ondas.

Tabela 1: Esquema de classificação recomendado pelo SEPM Bedforms e pelo Bedding Structures Research Symposium. Modificado de Ashley (1990).

DUNA SUBAQUOSA					
Descrições de primeira ordem (necessárias)					
		Pequena	Média	Grande	Muito grande
Tamanho (m)	Espaçamento =	0,6-5,0	5-10	10-100	> 100
	Altura =	0,075-0,4	0,4-0,75	0,75-5	> 5
Forma	Bidimensional (2D)				
	Tridimensional (3D)				
Descrições de segunda ordem (importantes)					
<ul style="list-style-type: none"> – Superposição: simples ou composta (tamanhos e orientação relativa) – Características do sedimento (tamanho, grau de seleção) 					
Descrições de terceira ordem (usuais)					
<ul style="list-style-type: none"> – Perfil da forma de fundo (Comprimentos e ângulos de inclinação dos lados “Lee” e “Stoss”) – Fração do fundo coberta por formas de fundo – Estrutura do escoamento (características temporais da velocidade) – Intensidades relativas dos escoamentos opostos – Comportamento e história de migração da duna (acrecção vertical e horizontal) 					

Ashley (1990) chama a atenção para a uma possível “afinidade genética” entre as dunas subaquosas e as dunas eólicas, uma vez que estas também formam uma continuidade na razão altura/espaçamento (Figura 7). Entretanto, o autor destaca

um possível efeito limitante da profundidade nas formas subaquosas, fazendo com que estas sejam mais baixas do que as dunas eólicas, principalmente entre aquelas com espaçamentos maiores. Neste contexto, o termo “subaquosa” é indispensável quando formos nos referir às dunas.

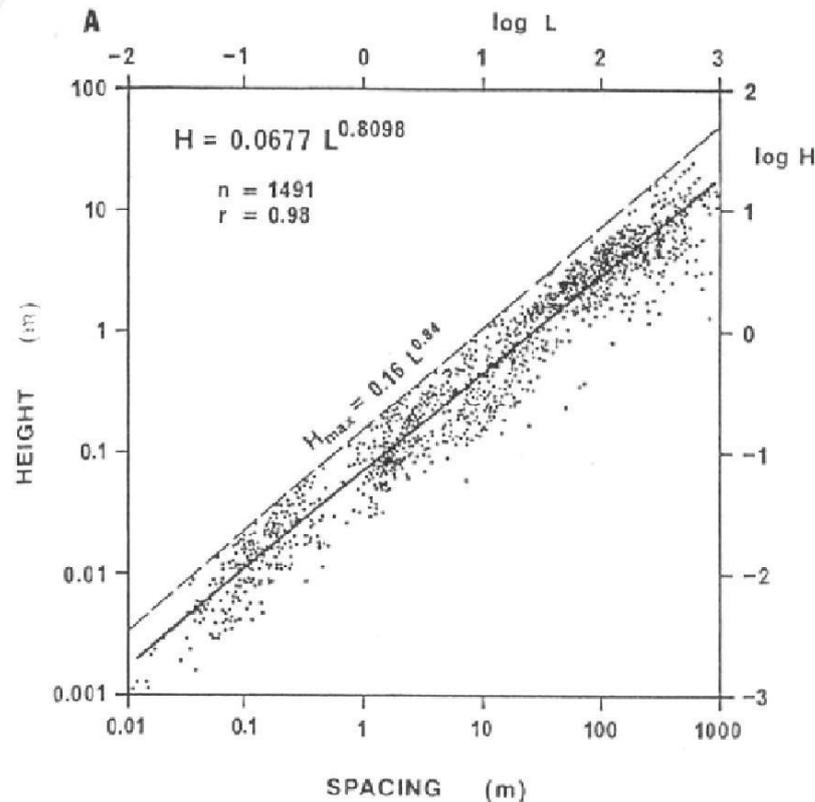


Figura 6: Gráfico de altura (H) e espaçamento (L), ambos em logaritmo, de 1491 formas de fundo subaquosas transversas ao escoamento (Flemming, 1988).

Observações em campo e experimentos revelam que as formas de fundo transversas aparentemente funcionam como um fator de resistência ao escoamento, estas então acabam migrando em função de receberem tensões de cisalhamento promovidas pelo movimento do fluido, sobre o fundo. No plano paralelo ao escoamento, um padrão repetitivo de convergência e divergência do escoamento interage com a coesividade do fundo e produz zonas alternantes de erosão e deposição, de forma que a tensão de cisalhamento aumenta e diminui, respectivamente, no mesmo sentido do movimento do fluido. Se este padrão de escoamento não se altera na terceira dimensão (perpendicularmente ao escoamento), não apresentando fortes vórtices e turbulências, a forma de fundo produzida possuirá crista retilínea, sendo denominada bidimensional (2D). No caso

de variações significativas do padrão de escoamento na terceira dimensão, e da presença de vórtices capazes de erodir e gerar depressões, são desenvolvidas formas de fundo com formato tridimensional (3D) (Figura 8) (Tabela 1) (Ashley, 1990).

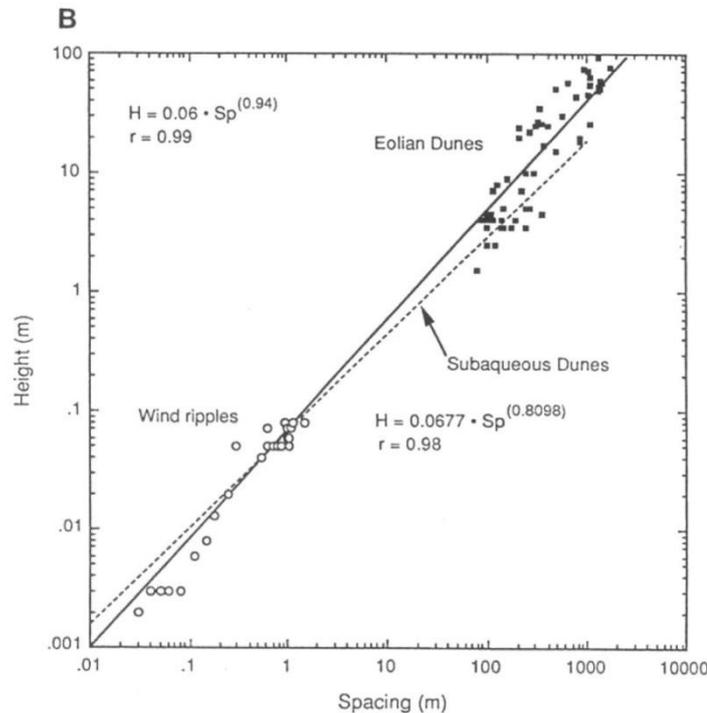


Figura 7: Gráfico logarítmico de "wind ripples" (círculos) e dunas eólicas (quadrados) e a regressão sendo comparada com aquela relativa à Figura 6 (linha pontilhada). Modificado de Lancaster (1988) por Ashley (1990).

Costello e Southard (1981) apresentam um gráfico de formas de fundo 2D e 3D, a partir de dados de flumes e ambientes dominados por maré, para uma dada profundidade e granulometria (Figura 9). Percebe-se que as formas 2D ocorrem sob escoamentos relativamente mais lentos do que aqueles onde se observam as formas 3D, o que reflete uma alteração na estrutura do escoamento em função do aumento das velocidades.

Com relação ao formato, as formas de fundo assimétricas são modeladas e mantidas por escoamentos de marés, em que uma corrente é mais dominante que a outra (van Veen, 1935). Portanto, a orientação relacionada à sua assimetria é um indicativo da direção do transporte sedimentar líquido. Algumas dunas, principalmente as maiores, podem apresentar outras formas de fundo sobrepostas, sendo, portanto denominadas compostas (Tabela 1). O fato de que as maiores formas de fundo são aparentemente estáticas, enquanto as menores são ativas,

está relacionado ao volume de sedimentos que compõem os dois tamanhos e ao tempo disponível para a migração da forma de fundo. Portanto, deve-se ressaltar que a disponibilidade de tempo e de espaço é fundamental para a migração das formas de fundo (Ashley, 1990).

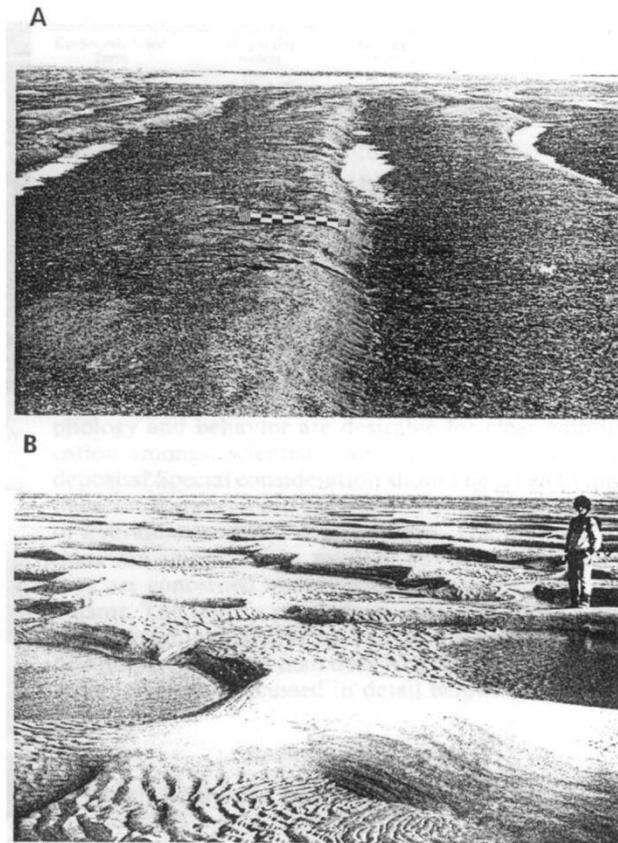


Figura 8: Pequenas dunas 2D (A, foto por R.W. Dalrymple) e 3D (B, foto por T. Elliott), ambas com espaçamento de 5 m. Modificado de Ashley (1990).

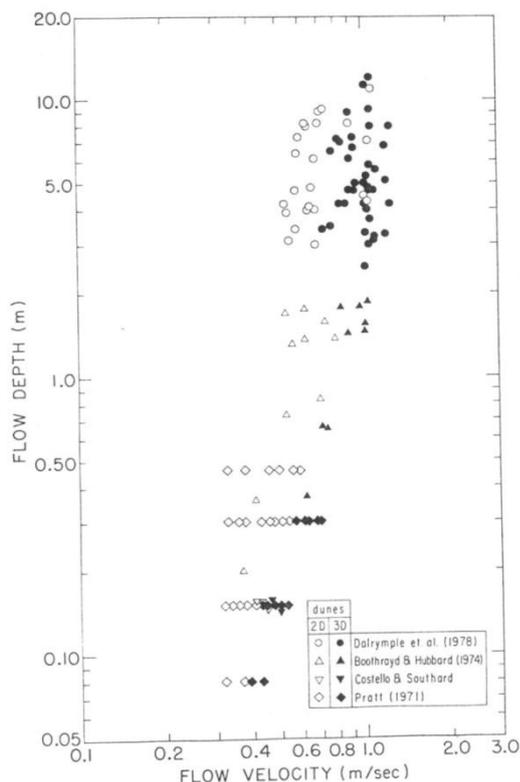


Figura 9: Diagrama profundidade e velocidade do escoamento para dunas de areias médias a grossas, em flumes e sob correntes de maré profundas. Modificado de Ashley (1990).

3.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Os sedimentos podem ser considerados fragmentos formados pela desintegração física, química e/ou biológica das rochas que compõem a crosta terrestre. Uma vez disponibilizados, eles podem ser transportados por gravidade, pelo vento e/ou pela água. Como a área de estudo se encontra na porção marinha do sistema estuarino, o agente de transporte considerado será a água do mar.

De acordo com van Rijn (1993) o processo de mobilização e remoção, a partir de um local de repouso, ou de uma fonte original, é denominado erosão.

No mar, as areias são movimentadas através de correntes (de maré, geradas por ondas e, por vento), ondas ou, mais comumente, pelos dois agentes atuando conjuntamente. Os sedimentos são deslocados a partir dos processos básicos de suspensão (“entrainment”), transporte e deposição (Figura 10). Estes três processos ocorrem ao mesmo tempo, interagindo entre si (Soulsby, 1997).

van Rijn (1993) faz uma categorização do transporte sedimentar, denominando Transporte de Fundo o rolamento, o deslizamento e a saltação dos grãos. Enquanto

o Transporte em Suspensão abrange as partículas suspensas na coluna de água (Figura 10). Este autor relata que a taxa de transporte de carga de fundo pode ser definida simplesmente como o produto da velocidade da partícula, da altura do salto e da concentração da carga de fundo.

Nittrouer e Wright (1994) acrescentam que estes dois tipos de transportes são controlados e modificados por processos gravitacionais, difusivos e advectivos, tais como a presença de sedimentos coesivos, velocidade da corrente, a densidade do fluido, a granulometria, além de formas de fundo e das influências biológicas.

Dyer (1997) chama a atenção para um terceiro tipo de transporte de sedimentos, exclusivo dos estuários, denominado carga de lavagem (“wash load”), correspondendo ao transporte das frações mais finas de sedimentos (argilas), sob todas as velocidades teóricas.

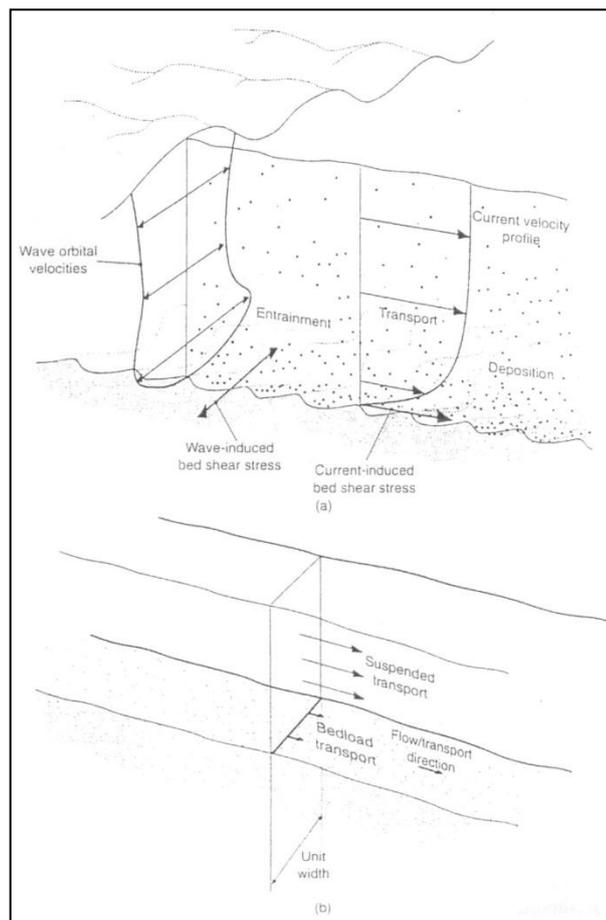


Figura 10: (a) Esquema dos processos de deslocamento do sedimento marinho e, (b) do plano normal ao escoamento, para definição da taxa de transporte sedimentar. Modificado de Soulsby (1997).

A movimentação da partícula ocorrerá de acordo com um balanço de forças instantâneas; ou seja, quando o fluido exercer uma força superior à força de resistência, sendo esta relacionada ao peso submerso e a um coeficiente de fricção da partícula (van Rijn, 1993).

Segundo Dyer e Soulsby (1988) o transporte é proporcional à tensão de cisalhamento, ou seja, a tensão instantânea de atrito. Percebe-se que o transporte é resultado da interação entre o escoamento e o grão, na forma de troca de quantidade de movimento (“momentum”).

Quando os escoamentos associados à onda e/ou correntes alcançam velocidades maiores que um valor crítico de movimentação, sedimentos arenosos são transportados como carga de fundo. Sendo que este transporte pode ocorrer (i) sobre um fundo plano, com escoamentos inferiores; (ii) conjuntamente com ripples ou formas de fundo maiores, no caso de escoamentos mais intensos; e (iii) sobre um fundo plano, associado à escoamentos muito intensos, de forma que as ripples são carregadas (escoamento laminar) (Soulsby, 1997). Com relação às taxas de migração das formas de fundo, Boothroyd (1985) indica que estes valores podem revelar detalhes nas taxas de transporte de areias por carga de fundo.

A migração de dunas subaquosas estaria limitada aos períodos mais energéticos de um ciclo de maré, os quais são muito curtos, podendo ser inferiores a uma hora (Klein, 1970; Dalrymple *et al.*, 1978; Klein e Whaley, 1972). Entretanto Langhorne (1982) enfatiza que a orientação assimétrica destas formas de fundo seja preservada sob condições hidrodinâmicas extremas, representando desta forma direções de transporte líquido.

Boothroyd (1985) chama a atenção para a importância de se realizar medições em estuários durante períodos de maré de sizígia, de forma que os processos associados às cargas de fundo sejam abordados confiavelmente.

3.3 MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS: *Sedtrans05*

As taxas de transporte de sedimentos da desembocadura do SEPAPM foram estimadas através do modelo de transporte de sedimentos *Sedtrans05*. Este foi desenvolvido pela Geological Survey of Canada – Atlantic (GSCA), visando

contribuir para o estudo e entendimento dos processos ocorrentes nas camadas de fundo dos oceanos, com certo enfoque para plataformas continentais e regiões costeiras (Neumeier *et al.*, 2008). A versão atual (Sedtrans05) corresponde a uma atualização de outros modelos de transporte de sedimentos, dentre eles cita-se o SEDTRANS96 (Li e Amos, 2001) e o SEDTRANS92 (Li e Amos, 1995).

Li e Amos (1995) caracterizam o SEDTRANS92 como um modelo computacional unidimensional, escrito em linguagem FORTRAN-77, com o objetivo principal de fornecer taxas de transporte sedimentar, a partir da ação de ondas e correntes ou, somente sob a ação de correntes. O Sedtrans05 também possui estas características, além de outras funções complementares. Este modelo é baseado no modelo combinado onda-corrente de camada limite de Grant e Madsen, podendo prever, dentre outros parâmetros, taxas de transporte de sedimentos, direção de transporte sedimentar líquido e, as possíveis formas de fundo associadas às características e, aos valores dos dados de entrada.

A seguir o leitor tem uma breve descrição da maneira como alguns parâmetros do modelo são calculados.

Segundo Li e Amos (2001), previsões acuradas de taxas de transporte de sedimentos são profundamente dependentes do valor de tensão de cisalhamento crítico. Todos os algoritmos de transporte nos modelos SEDTRANS utilizam a curva de Shields modificada para determinar o valor crítico do transporte por carga de fundo. Nielsen (1992) revela que o parâmetro de Shields (θ) (Shields, 1936; van Rijn, 1993) permite a análise do balanço das forças de distúrbio no grão e as forças estabilizadoras. Portanto, indica a relação entre a força de atrito do fluido e a força do peso submerso do grão de sedimento:

$$\theta = \frac{\tau(0)}{[\rho_s - \rho]gD}$$

sendo ρ_s e ρ , respectivamente, as massas específicas do fluido e do sedimento; g a aceleração devido à gravidade e; D o diâmetro do grão.

O critério adotado para valor limite de transporte por carga de fundo foi a velocidade de cisalhamento crítica, u_{*cr} . O Parâmetro de Shields Crítico θ_{cr} é obtido através do método de Yalin, de acordo com Miller *et al.* (1977), de forma que:

$$\begin{aligned} \log \theta_{cr} &= 0,041 \left[\log Y \right] - 0,356 \log Y - 0,977 & Y < 100 & \text{a)} \\ \log \theta_{cr} &= 0,132 \log Y - 1,804 & 100 < Y \leq 3000 & \text{b)} \\ \theta_{cr} &= 0,045 & Y > 3000 & \text{c)} \end{aligned}$$

onde o Parâmetro de Yalin Y é definido como $\left[\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g D^3 / \nu^2 \right]^{0,5}$ e; ν é o coeficiente de viscosidade cinemática do fluido. Este θ_{cr} pode ser utilizado para calcular a tensão de cisalhamento crítica τ_{cr} , da seguinte maneira:

$$\tau_{cr} = \theta_{cr} (\rho_s - \rho) g D \quad \text{d)}$$

e então, a velocidade de cisalhamento crítica u_{*cr} é obtida a partir da Lei Quadrática $\tau_{cr} = \rho \cdot u_{*cr}^2$ (Li e Amos, 2001).

É necessário se ter em mente o significado das tensões de cisalhamento, antes de prosseguirmos neste estudo. Soulsby (1997) relata que a tensão de cisalhamento total τ_o , atuando sobre o fundo, é constituída dos seguintes componentes:

- O “*skinfriction*” τ_{os} , produzido pelos (e atuando sobre os) grãos de sedimento
- O “*formdrag*” τ_{of} , produzido pelo campo de pressão associado ao escoamento sobre ripples e/ou outras feições maiores do fundo (dunas).
- Uma contribuição do transporte de sedimentos τ_{ot} , causada pela transferência de *momentum* para mobilização dos grãos.

Segundo o autor, estes componentes devem ser somados, para estimar a τ_o .

A interface de entrada de dados do Sedtrans05 fornece cinco tipos de algoritmos para o cálculo do transporte, relacionados às equações para carga de fundo (Einstein-Brown, Yalin e van Rijn) e para carga total, ou seja, carga de fundo e carga suspensa (Engelund-Hansen e Bagnold) (Neumeier *et al.*, 2008). Uma maior variedade de equações também permite uma maior adequabilidade da sensibilidade do modelo às condições locais. De forma que através de comparações entre os resultados gerados pelo modelo, podem-se visualizar as limitações e vantagens de cada equação. A seguir, as equações de transporte de sedimentos incorporadas ao

modelo, são brevemente descritas segundo Li e Amos (2001) e, Neumeier *et al.* (2008).

3.3.1 Equação de transporte de carga total de Engelund–Hansen

A equação original de Engelund e Hansen (1967) foi baseada em dados experimentais de flumes unidirecionais e foi direcionada a fundos cobertos por dunas, cujos sedimentos possuíam tamanho médio do grão superior a 0,15 mm. A equação de Engelund–Hansen, modificada para a plataforma continental (Li e Amos, 2001), é

$$q = 0,05 u_{100}^2 \rho^2 u_*^3 / D (\rho_s - \rho) g$$

onde q é a taxa de volume de sedimento transportado por unidade de largura do fundo, $\Delta\rho$ equivale a $(\rho_s - \rho)$ e u_* é uma forma geral da velocidade de cisalhamento “skin-friction”. O termo u_{100} equivale à velocidade do fluido a um metro do fundo.

3.3.2 Equação de transporte de carga de fundo de Einstein–Brown

A equação de Einstein-Brown para carga de fundo (Brown, 1950) também foi determinada a partir de experimentos em flumes, com escoamento unidirecional sobre sedimentos bem selecionados. A referida equação, com a tensão de cisalhamento sendo convertida para velocidade de cisalhamento, é

$$q = 40 W_s D (\rho_s - \rho) g u_*^5 / |u_*|$$

em que W_s equivale à velocidade de decantação do sedimento. Para esta equação, a escala recomendada de variação do tamanho dos grãos é de 0,3 mm a 29 mm.

3.3.3 Equação de transporte de carga total de Bagnold

Esta equação é baseada no princípio de que a onda é responsável pela suspensão do sedimento, enquanto o transporte líquido de sedimentos é associado às correntes (Bagnold, 1963). Para escoamentos combinados onda e corrente utilizam-se, no

cálculo da taxa de transporte de sedimentos líquida, uma tensão de cisalhamento “skin-friction” combinada máxima (não a instantânea) τ_{cws} , conforme a equação

$$q = K \tau_{cws} u_{100} / (\rho_s - \rho) g \quad (1)$$

sendo que K é o coeficiente de proporcionalidade descrito pela equação empírica de Sternberg (1972)

$$K = M \exp \left[0,7 \left(\frac{\tau_{cws} - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \right) \right] \quad (2)$$

onde M é um coeficiente empírico equivalente a 0,005. Neste caso, a direção do transporte é adotada como sendo a mesma direção da corrente atuante. Para o caso de atuação única de correntes, o modelo utiliza a equação de Bagnold modificada por Gadd *et al.* (1978)

$$q = \beta / \rho_s \left(u_{100} - u_{cr} \right)^3 \quad (3)$$

de forma que a velocidade crítica para início do transporte de carga de fundo u_{cr} é obtida a partir de $\tau_{cr} = 0,5 \rho f_{cs} u_{cr}^2$. O termo f_{cs} é o fator “skin-friction” para correntes, assumido como 0,006, com base em experimentos de campo realizados por Sternberg (1972) e Soulsby (1983). O coeficiente β ($\text{Kg s}^2 \text{m}^{-4}$) está relacionado ao tamanho do grão, de forma que Gadd *et al.* (1978) sugeriu, com base em dados de experimentos em flumes, os valores $1,73 - 7,22 \times 10^{-3}$ para tamanhos de grão variando entre 0,18 – 0,45 mm.

3.3.4 Equação de transporte de carga de fundo de Yalin

A equação de carga de fundo sugerida por Yalin (1963) é

$$q = 0,635 D u_* \left[\frac{\tau_* - a}{\tau_*} \right] \ln \left(\frac{\tau_* + a}{\tau_*} \right) \quad (4)$$

onde $\tau_* = \frac{\tau_b - \tau_{cr}}{\tau_{cr}}$ é o excesso normalizado de tensão de cisalhamento, e a equivale à $2,45 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{0,4} \left(\frac{\tau_{cr}}{\Delta \rho g D} \right)^{0,5}$. A aplicação desta equação de transporte de sedimentos geralmente é limitada a grãos com granulometria maiores ou iguais a 0,2 mm.

3.3.5 Equação de transporte de carga de fundo de van Rijn

van Rijn (1993) seguiu a aproximação de Bagnold e assumiu que a movimentação das partículas sob carga de fundo é dominada pela saltação, a qual é influenciada pela gravidade e pelas forças hidrodinâmicas do fluido. As características deste tipo de deslocamento dos grãos têm sido determinadas pela resolução de equações de movimento para uma única partícula. Adota-se que a taxa instantânea do transporte de carga de fundo está relacionada a um parâmetro de tensão de cisalhamento adimensional (T_m). Assumindo uma situação com apenas a presença de corrente, a taxa de transporte de carga de fundo seria

$$q = \alpha (s - 1)^{0,5} g^{0,5} D^{1,5} D_*^{-0,3} T_m^{2,1} \quad (1)$$

sendo s a razão entre as massas específicas do sedimento e da água, α é uma constante igual a 0,053 e, T_m é calculado como

$$T_m = \frac{\tau_{cs} - \tau_{crb}}{\tau_{crb}} \quad (1)$$

onde τ_{cs} é a tensão de cisalhamento “skin-friction” devido à corrente e, τ_{crb} é a tensão de cisalhamento crítica para o início do movimento da carga de fundo.

3.4 BANCOS ARENOSOS

A ocorrência de bancos arenosos depende da presença de correntes de maré (ou outras) capazes de mobilizar as areias e, da disponibilidade destas (Dyer e Huntley, 1999). Klein (1985) destaca que os corpos arenosos de regiões intermarés tendem a ocorrer ao longo de costas de macro e mesomaré, mas também podem ocorrer em alguns complexos estuarinos. Os bancos arenosos podem ser categorizados como ativos ou moribundos, sendo que os ativos ocorrem em águas rasas, indicando que sua formação e preservação ocorreram sob condições de aumento do nível do mar. (Dyer e Huntley, 1999). A migração e a orientação das formas de fundo, assim como a topografia dos corpos arenosos, a distribuição de *facies* sedimentares e, os padrões de dispersão de areias, são profundamente controlados pela assimetria temporal e de velocidades das correntes de maré, sobre os corpos arenosos (Klein, 1970; Balazs e Klein, 1972; Boersma e Terwindt, 1981).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PROCEDIMENTO DE CAMPO

Neste tópico são apresentados os procedimentos para a obtenção dos dados hidrodinâmicos e sedimentológicos de três locais da desembocadura do SEPAPM.

4.1.1 Hidrodinâmica e Transporte de Sedimentos

Para adquirir os dados hidrodinâmicas da desembocadura do SEPAPM que foram inseridos no modelo de transporte de sedimentos, utilizaram-se três equipamentos. Dentre eles, dois perfiladores de velocidade, do tipo *Acoustic Doppler Profiler* (ADP), modelos *Sontek XR Argonaut* e *Nortek AS Aquadopp*. E um medidor pontual, do tipo *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV), modelo *Sontek Triton*. Os locais de fundeio destes equipamentos são mostrados na Figura 11.

O *Argonaut* (P2) foi fundeado sobre o banco arenoso, no fundo do canal mais próximo à praia dentre os outros canais também permanentes que atravessam este depósito arenoso. Esta praia serviu de acesso para a realização dos campos sobre o banco arenoso. Não foi possível fundeá-lo em um canal mais profundo devido a limitações logísticas. Por sua vez, o *Aquadopp* (P1) foi fundeado no canal de acesso ao SEPAPM, com auxílio de embarcação, de maneira que estivesse o mais próximo possível do banco arenoso, e do *Argonaut* (Figura 11).

Já o ADV (P3) também foi fundeado sobre o banco arenoso, porém, de forma que sua localização garantisse a integridade do equipamento, uma vez que este realizou medições a dez centímetros do fundo. Desta forma, optou-se por um local mais raso e abrigado (Figura 11), para que o transporte de sedimentos por carga de fundo não fosse tão intenso, a ponto de comprometer os transdutores do equipamento e, conseqüentemente, suas medições. Esta distribuição espacial dos equipamentos teve por objetivo verificar a influência do banco arenoso sobre o padrão hidrodinâmico e de dinâmica sedimentar da desembocadura do SEPAPM.

A Tabela 2 fornece as informações relativas aos fundeios dos equipamentos. Os dados fornecidos pelo ADV, relativos ao dia 21/07 (quadratura), foram utilizados

somente para a calibração do modelo Sedtrans05, metodologia que será explicada posteriormente. Dessa forma, os outros três dias correspondem ambos a momentos de marés de sizígia na área de estudo (DHN, 2010). Os três equipamentos foram configurados para obter os dados de magnitude e direção das correntes a cada quinze minutos. Sendo que estes dados correspondem a uma média de um subintervalo de três minutos para os ADPs, e de um minuto para o ADV.



Figura 11: Localização dos pontos de fundeio dos ADPs *Aquadopp* (P1) e *Argonaut* (P2), e do ADV *Triton* (P3), na desembocadura do SEPAPM. FONTE: Fotografias aéreas fornecidas pelo professor Dr. Alex Cardoso Bastos.

Para o fundeio dos ADPs e do ADV, foram utilizadas estruturas rígidas (Figuras 12 e 13), visando sustentação e, proteção contra interferência do leito na emissão e recepção das ondas sonoras. Os primeiros foram posicionados com os transdutores voltados para a superfície da coluna de água (Figura 12(a) e (b)), enquanto o ADV realizou medições com os transdutores voltados para o fundo (Figura 13).

Os ADPs são equipamentos amplamente utilizados nas medições de magnitude e sentido de correntes ao longo da coluna de água (Moura, 2009; NORTEK, 2008; Shields *et al.*, 2003), e seu funcionamento baseia-se no Efeito Doppler. Pulsos sonoros (“*beams*”), de frequências conhecidas, são emitidos e recebidos por transdutores. Segundo Gordon (1989), a diferença de frequência entre as ondas sonoras emitidas pelos transdutores e aquelas refletidas em sedimentos, bolhas e no plâncton, que retornam aos mesmos, é proporcional à velocidade relativa entre o equipamento e essas partículas, emersas na água. Já que a orientação relativa dos transdutores é conhecida e, sabendo que, devido ao reduzido tamanho, as partículas refletoras tendem a acompanhar o movimento da água, o perfil de magnitude e sentido das correntes do escoamento pode ser obtido pela combinação dos dados dos três “*beams*”. Os ADPs fazem uma perfilagem da coluna de água, em termos de velocidade, subdividindo-a em células de medição. Como o objetivo do estudo é estimar as taxas de transporte de sedimentos próximas ao leito, foram utilizados somente os dados relativos à primeira célula de medição (a partir do fundo) de cada equipamento (ver altura de medição na Tabela 2).

Tabela 2: Características dos fundeios dos ADPs e do ADV, e previsões para as marés (DHN, 2010), nos respectivos dias. A altura de medição é relativa à distância a partir do fundo.

Equipamento	Coordenadas Geográficas (UTM)		Data do fundeio	Previsões das Marés (DHN, 2010)		Período de Coleta (hh:mm)		Altura de medição (m)	Frequência de operação (MHz)
	X	Y		Horário (hh:mm)	Altura (m)	Início	Final		
Aquadopp	0379613	7793588	2/3/2010	10:02	0,1	9:40	21:40	0,8	2,0
				16:06	1,6				
				22:32	0				

<i>Triton</i>	<i>Argonaut</i>
0379514	0379555
7793731	7793726
26/7/2010	2/3/2010
21:24	22:32
15:32	16:06
9:17	10:02
18:23	5:45
12:23	11:25
5:45	11:25
0,3	0
1,3	1,6
0	0,1
0,5	0,4
1,1	0,4
7:45	7:45
10:45	18:30
19:30	22:10
0,10	1,35
10,0	1,5

No caso do ADV *Triton*, sua elevada frequência de operação permite a obtenção de dados com elevada resolução. Seu princípio de funcionamento também é baseado no Efeito Doppler, explicado anteriormente (SONTEK, 2008). Adicionalmente, este modelo utilizado nos campos possui sensor que permitiu a medição de parâmetros de ondas (altura e período), coletados a cada hora de fundeio.

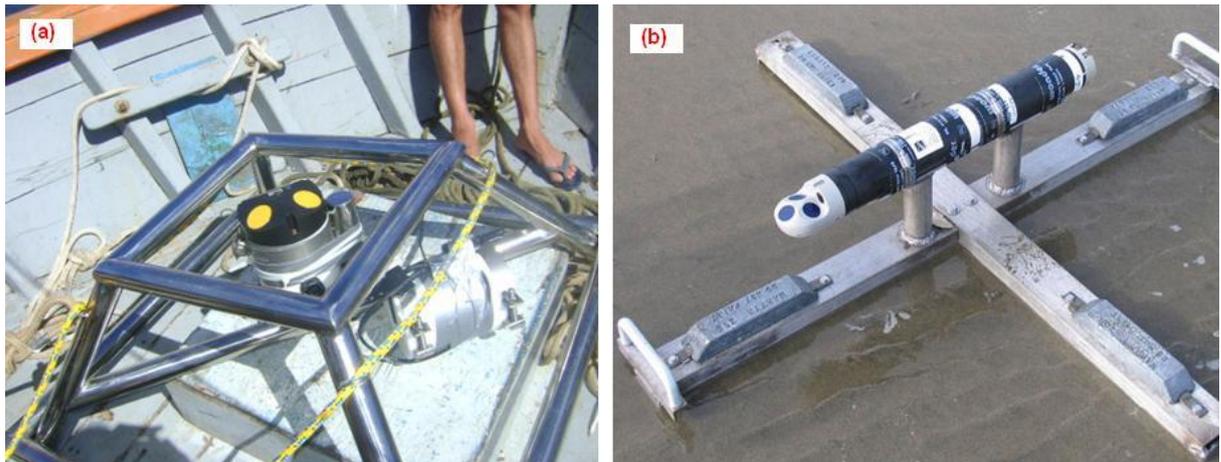


Figura 12: Perfiladores de velocidade, em suas estruturas de sustentação para fundeios. (a) *Sontek XR Argonaut*. (b) *Nortek AS Aquadopp*.



Figura 13: ADV *Sontek Triton* em seu local de fundeio. Ao fundo, a praia estuarina utilizada nos campos realizados sobre o banco arenoso.

4.1.2 Calibração do Modelo de Transporte de Sedimentos Sedtrans05.

A equação utilizada para o cálculo da taxa de transporte de sedimentos do modelo Sedtrans05 foi escolhida a partir de uma calibração. Este procedimento foi realizado por meio de um equipamento amostrador de carga de fundo, do tipo Helley-Smith, (armadilha de sedimento) (Figura 14), o qual consiste em uma estrutura de sustentação, com uma sacola de malha pré-definida (0,06 mm), acoplada a um bocal.



Figura 14: Equipamento amostrador de carga de fundo, do tipo Helley-Smith.

A presença de aletas faz com que o equipamento se mantenha na mesma direção da corrente predominante, de forma que o bocal permaneça na posição correta para armazenar os sedimentos na sacola de amostragem.

A taxa de transporte *in situ* foi calculada relacionando a massa de sedimento (em quilogramas) coletada, com o tempo de duração da coleta (300 segundos) e, com a largura do bocal da armadilha (0,0762 m). Esta taxa medida (Kg/s/m) foi então utilizada na comparação com aquelas fornecidas pelas equações do modelo (previstas), para que fosse escolhida a equação com resultado mais aproximado.

Estas coletas foram realizadas de uma em uma hora, para que as amostras pudessem ser armazenadas com segurança, e para coincidir com os dados hidrodinâmicos coletados pelo ADV (correntes e ondas). O número de coletas variou em função destes horários de obtenção dos dados, e da presença de coluna de água mínima e luz natural. As amostras de sedimentos que ficaram retidas na sacola

de armazenagem da armadilha continham grande quantidade de material orgânico, principalmente fragmentos da folhagem da vegetação da praia estuarina (Figura 15).



Figura 15: Detalhe dos fragmentos da folhagem (em preto) da vegetação da praia estuarina.

Desta forma, surgiu a necessidade de se verificar uma possível diferença na calibração das taxas previstas pelo Setrans05, utilizando a massa sem este material orgânico (Massa resultante), quando comparada a Massa total coletada pela armadilha de sedimentos. Ou seja, foram definidos dois tipos de taxas *in situ*.

4.1.3 Geometria e migração das formas de fundo

A avaliação da taxa de migração de uma forma de fundo, após um ciclo de maré, é um processo complicado, pois é necessário o acompanhamento fiel da feição em relação a um ponto fixo. Sendo que se deve garantir a permanência deste ponto de referência no mesmo local, ao longo do período do experimento. Como o erro associado ao Sistema de Posicionamento Global (Global Positioning System – GPS)

utilizado neste estudo é de aproximadamente 10 metros, ou seja, maior que as feições observadas, não foi possível utilizar este equipamento para demarcar as posições iniciais (pontos de referência) das formas de fundo. Esta demarcação foi então realizada através de vergalhões (estruturas metálicas rígidas), os quais foram inseridos verticalmente na região mais profunda da cava de quatro formas de fundo em seqüência, no mesmo canal onde foi fundeado o ADP *Argonaut* (P2, Figura 11), seguindo uma trajetória aproximadamente retilínea (Figura 16).

Este local foi escolhido, por apresentar formas de fundo com grandes dimensões, o que facilita sua localização após o ciclo de maré. Desta forma as diferenças (comprimentos) entre as posições iniciais e finais dos vergalhões, em relação às cavas das formas de fundo, foram utilizadas para estimar as taxas de migração resultantes para o ciclo de maré. Este procedimento foi realizado nos dias 21 e 26 de julho de 2010, para efeito de comparação entre as taxas de migração durante os momentos de quadratura e sizígia, respectivamente.

Os mesmos vergalhões utilizados nos experimentos de migração serviram para a medição dos comprimentos de onda das formas de fundo, através de suas distâncias relativas. Como estas formas de fundo não ficaram emersas durante os experimentos, não foi possível medir a altura destas feições, em função da coluna de água. Desta forma foram obtidas alturas através da equação de Flemming (1988), $H = 0,0677 L^{0,8098}$, em que L refere-se ao espaçamento entre as formas de fundo.

Esta aproximação também foi utilizada para a obtenção das alturas das formas de fundo neste local, no dia do fundeio do *Argonaut*. No caso do *Triton*, ambos os parâmetros foram medidos diretamente, uma vez que elas permaneceram expostas em determinados momentos dos fundeios do ADV.

As formas de fundo relativas ao local de fundeio do *Aquadopp* foram analisadas a partir de “imagens acústicas” do fundo do canal de acesso ao SEPAPM, obtidas através de um mapeamento realizado com um sonar de varredura lateral (Side Scan Sonar - SSS). O levantamento dos dados sonográficos foi realizado no dia 08 de Dezembro de 2009. Sendo, portanto, distinto daquele em que foi realizado o fundeio do ADP (02/03/2010). Por motivos logísticos, não foi possível realizar o fundeio e o levantamento sonográfico no mesmo período. Este imageamento do fundo foi realizado com um sonar modelo *EdgeTech 4100* associado a um sistema de

aquisição digital modelo 560p, utilizando o software de aquisição *Discover 4100*. Como transdutor deste sistema, foi utilizado um “peixe” *272TD*, sendo rebocado a uma profundidade de cerca de 10 % da profundidade local, operando com uma frequência de 500 KHz (Figura 17). As coordenadas do levantamento foram obtidas com um GPS, modelo *Garmin MAP 76CSX*, cuja acuracidade equivale a 5 m.



Figura 16: Experimento para estimar as taxas de migração das formas de fundo, realizado no dia 21/07/2010 (Quadratura). Observar os quatro vergalhões de referência para as medições.

Uma vez registradas pelo software de aquisição *Discover 4100*, as imagens acústicas do assoalho do canal passaram por um processamento no software *SonarWiz.Map* da empresa *Chesapeake Technology*. O qual consistiu na realização das devidas correções associadas a esta aquisição de dados sonográficos, como aquelas relacionadas à velocidade da embarcação e ao *slant range*. Após estas correções, as linhas sonográficas foram agrupadas em um mosaico, utilizando para tanto este mesmo software. Então, as formas de fundo associadas à região cujas coordenadas eram próximas ao local de fundeio do *Aquadopp* puderam ser

analisadas e mensuradas, de acordo com o padrão de intensidade do retorno do sinal acústico (IRSA). As medições dos comprimentos de onda e das alturas foram realizados com o software *SonarWiz.Map*.



Figura 17: (a) Transdutor ou peixe 272TD, emissor e receptor do pulso sonoro; (b) processador (caixa amarela) conectado a um laptop com o software de aquisição dos dados *Discover 4100* instalado.

Nos locais de fundeio dos ADPs (P1 e P2) foram coletadas amostras de sedimentos, para a determinação de uma granulometria a ser inserida no modelo de transporte de sedimentos.

Para uma caracterização sedimentológica das formas de fundo estudadas nos experimentos de taxas de migração, e daquelas próximas ao local de fundeio do ADV (P3), foram coletadas amostras de sedimentos em suas feições de crista e de cava, nos campos dos dias 21 e 26/07/2010.

4.2 ANÁLISE LABORATORIAL

Neste tópico são descritos os procedimentos laboratoriais realizados com as amostras de sedimentos e com os demais dados obtidos nos campos acima citados.

4.2.1 Tratamento das amostras de sedimentos

Uma vez coletadas do ambiente, as amostras de sedimentos foram lavadas para que o conteúdo de sais intersticiais não influenciasse no peso total destas. Cada amostra foi lavada três vezes, e a seguir levada à estufa para secagem. As amostras foram submetidas a temperaturas inferiores a 60 °C, visando à conservação de seu conteúdo de material carbonático (Muehe, 1996).

No caso das amostras do experimento de calibração, uma vez desumificadas, foi possível registrar sua massa total. Para a determinação das massas resultantes, as amostras foram colocadas em um forno mufla, e submetidas às temperaturas aproximadas de 450°C, por um período de cinco horas (Mook e Hoskin, 1982). Este método visou à queima do material orgânico citado anteriormente, para obter a massa de sedimentos resultante. Devido à reduzida massa das amostras coletadas, estas foram queimadas totalmente, ou em frações, devido à capacidade dos cadinhos utilizados.

Uma vez desumificadas, as demais amostras de sedimentos coletadas nos campos foram homogeneizadas, através da passagem por um quarteador de Jones. Durante este processo, foram separadas subamostras de aproximadamente 100g e 20g para as análises granulométricas e de teor de CaCO₃, respectivamente. Todas as amostras deste estudo foram pesadas em balança com precisão de quatro casas decimais.

4.2.2 Análise granulométrica

A granulometria de uma amostra de sedimentos pode ser realizada através de peneiramento via úmida ou via seca; ou ainda, através da pipetagem, no caso de amostras lamosas (Dias, 2004). Para a análise em questão foi realizado o peneiramento via seca das subamostras, uma vez que visualmente, estas eram predominantemente arenosas.

As amostras foram despejadas no topo de uma torre de peneiramento, montada sobre um agitador mecânico. A diferença entre as malhas das peneiras utilizadas foi de 0,5 ϕ (Φ). Este conceito de granulometria foi introduzido por Krumbein (1934), em que ϕ equivale ao logaritmo negativo, na base dois, do diâmetro do grão em milímetros [$\Phi = -\log_2(\text{mm})$]. Geralmente adota-se um período de agitação de 15 min. para cada amostra (Folk e Ward, 1957), e a massa de sedimentos relativa a cada peneira foi anotada e digitalizada posteriormente.

Estes dados de massa permitiram a realização de cálculos estatísticos, com o software *GRADSTAT* (*Grain Size Distribution and Statistics*), desenvolvido por Simon Blott. Os resultados fornecidos pelo *GRADSTAT* são baseados no método de Folk e Ward (1957), sendo expressos tanto em escala logarítmica (baseada em uma distribuição log-normal, em que os tamanhos dos grãos são expressos em ϕ) quanto em escala geométrica (com base em uma distribuição log-normal, em que os tamanhos dos grãos são expressos em valores métricos) (Blott e Pye, 2001).

As amostras foram classificadas, em termos de tamanho das partículas, segundo a classificação proposta por Wentworth (1922), a qual apresenta os mesmos limites daquela adotada pelo *GRADSTAT*, para as malhas inicial (-2Φ ou 4 mm) e final ($+4\Phi$ ou 63 μm), utilizadas no peneiramento. A delimitação da classificação utilizada neste estudo é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3: Classificação granulométrica de Wentworth (1922), adotada na classificação das amostras de sedimentos submetidas à análise granulométrica.

Classe	Granulometria	
	ϕ (Φ)	Diâmetro (mm)
Cascalho	-6 a -1	64 a 2
Areia muito grossa	-1 a 0	2 a 1
Areia grossa	0 a 1	1 a 0,50
Areia média	1 a 2	0,50 a 0,25
Areia fina	2 a 3	0,25 a 0,125
Areia muito fina	3 a 4	0,125 a 0,0625
Silte	4 a 8	0,0625 a 0,0039

As amostras foram agrupadas em termos de grau de seleção e de assimetria, segundo o método de Folk e Ward (1957) original (em Φ) e por aquele modificado pelo *GRADSTAT* (em μm), cujos valores limitantes são dispostos nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4: Classificação em termos de grau de seleção segundo o método de Folk e Ward (1957) original (em Φ) e, segundo aquele modificado pelo *GRADSTAT* (em μm).

Grau de seleção	Método	
	Folk e Ward (1957) (Φ)	GRADISTAT (μm)
Muito bem selecionado	< 0,35	< 1,27
Bem selecionado	0,35 – 0,50	1,27 – 1,41
Moderadamente bem selecionado	0,50 – 0,70	1,41 – 1,62
Moderadamente selecionado	0,70 – 1,00	1,62 – 2,00
Mal selecionado	1,00 – 2,00	2,00 – 4,00
Muito mal selecionado	2,00 – 4,00	4,00 – 16,00
Extremamente mal selecionado	> 4,00	> 16,00

Tabela 5: Classificação em termos de simetria, segundo os métodos de Folk e Ward (1957) original (em Φ) e, aquele modificado pelo *GRADSTAT* (em μm).

Assimetria	Método	
	Folk e Ward (1957) (Φ)	GRADISTAT (μm)
Fortemente assimétrica no sentido dos finos	+0,3 a +1,0	-0,3 a -1,0
Assimétrica no sentido dos finos	+0,1 a +0,3	-0,1 a -0,3
Simétrica	+0,1 a -0,1	-0,1 a +0,1
Assimétrica no sentido dos grossos	-0,1 a -0,3	+0,1 a +0,3
Fortemente assimétrica no sentido dos grossos	-0,3 a -1,0	+0,3 a +1,0

4.2.3 Análise do teor de Carbonato de Cálcio (CaCO_3)

As subamostras foram submetidas à determinada quantidade de Ácido Clorídrico (HCl) 33%, visando à queima dos sedimentos carbonáticos. O volume de reagente utilizado é relativo ao teor de carbonato de cálcio da subamostra, de modo que a

reação de queima é finalizada quando não é observada a presença de bolhas, associadas à liberação de gás carbônico (CO₂). Ao final do processo, as subamostras foram novamente pesadas, e a diferença de massas obtida, foi utilizada como o teor de CaCO₃, expresso em porcentagem.

Uma vez obtidos os teores de CaCO₃ e as estatísticas relativas à análise granulométrica, as amostras foram agrupadas de acordo com a classificação de Larssonneur (1977, modificada por Dias, 1996), mostrada na Figura 18.

9 SUBDIVISÕES PRINCIPAIS	SEIXOS, COQUINAS OU RODILITOS L<15%; s+c+r >50%		GRÂNULOS L<15%; s+c+r <50% Md > 2mm		AREIAS L<15%; Areia + Lama >50 % Md < 2mm					SEDIMENTOS LAMOSOS L > 15 %					
	SEIXOS LITOCLASTÍCOS		GRÂNULOS LITOCLASTÍCOS		AREIAS LITOCLASTÍCAS					LAMAS TERRÍGENAS					
SEDIMENTO LITOCLASTÍCO CaCO ₃ < 30%	s+c+r >70% SL1a	s+c+r <70% SL1b	s+c+r >15% GL1a	s+c+r <15% GL1b	15% < + 2 mm < 50 %		+ 2 mm < 15%			L < 25%	25% < L < 75%	L > 75%			
	cascalho litoclastico	cascalho litoclastico	grânulos litocl. c/ cascalho	grânulos litoclasticos	s+c+r > gran AL1a	g > s+c+r AL1b	2 a 0,5 mm. AL1c	0,5 a 0,25 mm AL1d	0,25 a 0,05 mm AL1e	areia litoclastica c/ cascalho	areia litoclastica c/ granulos	areia litoclast. muito grossa a grossa	areia litoclastica media	areia litoclastica fina a muito fina	lama arenosa terrigena
SEDIMENTO LITOBIO CLÁSTICO 30% < CaCO ₃ < 50%	s+c+r >70% SL2a	s+c+r <70% SL2b	s+c+r >15% GL2a	s+c+r <15% GL2b *	15% < + 2 mm < 50 %		+ 2 mm < 15%			L < 25%	25% < L < 75%	L > 75%			
	cascalho litobioclastico	cascalho litobioclastico	grânulos litob. c/cascalho	grânulos litobioclasticos	s+c+r > g AL2a	g > s+c+r AL2b	2 a 0,5 mm. AL2c	0,5 a 0,25 mm AL2d	0,25 a 0,05mm AL2e	areia litobioclastica c/ cascalho	areia litobioclastica c/ granulos	areia litobioclastica muito grossa a grossa	areia litobioclastica media	areia litobioclastica fina a muito fina	marga arenosa
SEDIMENTO BIOLITICO CLÁSTICO 50% < CaCO ₃ < 70%	c+r+s >70% CB1a	c+r+s <70% CB1b	c+r+s >15% GB1a	c+r+s <15% GB1b *	15% < + 2 mm < 50 %		+ 2 mm < 15%			L < 25%	25% < L < 75%	L > 75%			
	coq/rodolito c/ litoclasticos	cascalho biolitoclastico	grânulo biolitoclastico	grânulo biolitoclastico	c+r+s > g AB1a	c+r+s < g AB1b	2 a 0,5 mm. AB1c	0,5 a 0,25 mm AB1d	0,25 a 0,05 mm AB1e	areia biolitocl. c/ cascalho	areia biolitocl. c/ granulos	areia biolitocl. muito grossa a grossa	areia biolitoclastica media	areia biolitoclastica fina a muito fina	marga calcarea arenosa
SEDIMENTO BIOLITICOS CaCO ₃ > 70%	c+r+s >70% CB2a	c+r+s <70% CB2b	c+r+s >15% GB2a	c+r+s <15% GB2b *	15% < + 2 mm < 50 %		+ 2 mm < 15%			L < 25%	25% < L < 75%	L > 75%			
	coquinas ou rodolitos	cascalho bioclastico	grânulo biocl. conchifero ou c/ rodolitos	grânulo bioclastico	c+r+s > g AB2a	g > c+r+s AB2b	2 a 0,5 mm. AB2c	0,5 a 0,25 mm AB2d	0,25 a 0,05 mm AB2e	bioclastica c/ nodulos ou conchas	areia bioclastica c/ granulosa	areia bioclastica muito grossa a grossa	areia bioclastica media	areia bioclastica fina a muito fina	lama calcarea arenosa

Figura 18: Classificação de sedimentos marinhos de Larssonneur (1977, modificada por Dias, 1996). Md = mediana; L = lama; c = coquina (>20 mm); s. = seixos (4 a 65 mm); g = grânulos (2 a 4mm) r = rodolitos (nódulos de algas calcáreas).

4.2.4 Assimetrias temporal e de velocidade das correntes

Para uma melhor interpretação do comportamento das correntes durante os fundeios, foram calculadas as magnitudes e os ângulos resultantes dos vetores de velocidade, em cada fundeio. As características destes vetores serão utilizadas para inferir o domínio da maré em cada fundeio. Foi adotado o sistema de coordenadas ENU (East – North - Up), em que os valores negativos significam sentido oposto, ou seja, Oeste ou Sul. Neste estudo não foram analisadas as velocidades verticais.

Para o cálculo do valor resultante das duas componentes (Leste–Oeste e Norte-Sul) foram realizadas médias para cada sentido (Leste, Oeste, Norte e Sul). Então, as médias dos respectivos sentidos em cada componente foram somadas, gerando um

valor resultante, positivo ou negativo. Com os valores das componentes, foi possível obter a magnitude e o ângulo dos vetores resultantes em cada fundeio.

4.2.5 Calibração do modelo e cálculo das taxas de transporte de sedimentos

Para o cálculo das taxas previstas no experimento de calibração do Sedtrans05, utilizando as cinco equações de transporte de sedimentos, foram inseridos os seguintes dados oriundos do ADV *Triton*: Profundidade da coluna de água (em metros); Velocidade da corrente a uma determinada profundidade (em m/s); Direção da corrente (em graus a partir do Norte); Altura, em relação ao fundo, da corrente medida (em metros); Altura (em metros) e o período (em segundos) da onda medida; Temperatura da água (em °C). Também foram inseridos os dados de granulometria (em metros) obtidos com o peneiramento das amostras resultantes (sem matéria orgânica). Foram utilizados a altura e o comprimento (médios) das formas de fundo (0,0446 e 0,1431 metros, respectivamente) medidos. Por convenção, foi utilizado o valor padrão da salinidade da água do mar (35). E como massa específica do sedimento, foi considerado o valor relativo ao mineral quartzo (2650 kg/m^3). O fundo foi definido como sem inclinação (plano, mas com formas de fundo). Infelizmente, não foram obtidos dados de direção de onda (em graus em relação ao Norte).

Uma vez definida a equação de taxa de transporte de sedimentos a ser utilizada, foram inseridos no modelo as profundidades da coluna de água (em metros) relativas aos locais de fundeio dos ADPs. Não foram obtidos dados relativos às ondas, sendo utilizados apenas a velocidade da corrente a uma determinada profundidade (em m/s) e a direção desta (em graus a partir do Norte). Foram considerados os valores de 25 °C e 35, relativos à temperatura e salinidade da água do mar, respectivamente. A granulometria foi obtida do peneiramento das amostras coletadas nos respectivos pontos de fundeio (P1 e P2). Também foi considerado um fundo sem inclinação (plano, mas com formas de fundo). Desta forma, foi possível obter três estimativas pontuais de taxas de transporte de sedimentos na desembocadura do SEPAPM.

A exemplo do que foi feito na análise de assimetrias das correntes de maré, os vetores destas taxas de transporte foram separados em componentes Leste-Oeste e Norte-Sul, para que fossem definidas suas magnitudes e seus sentidos resultantes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Neste tópico são apresentados os dados relativos às condições hidrodinâmicas da desembocadura do SEPAPM, coletados pelos ADPs e pelo ADV. Assim como os resultados da calibração do modelo Sedtrans05 e, os resultados da modelagem de transporte de sedimentos.

5.1.1 Assimetrias Temporal e de Velocidades das Correntes

A seguir são apresentados os valores de magnitude e sentido dos vetores de velocidades de corrente, coletados pelos ADPs e pelo ADV, ambos em momentos de marés de sizígia na desembocadura do SEPAPM.

5.1.1.1 Dados do fundeio no canal (ADP - Aquadopp)

A Figura 19 mostra os dados obtidos com o perfilador de velocidades *Aquadopp*, os quais abrangem um período de 12 horas do comportamento das correntes de maré no canal de acesso ao SEPAPM.

A partir da Figura 19b, percebe-se que no início do fundeio o vetor das correntes possui um sentido nordeste, e devido à orientação aproximada Oeste-Leste da desembocadura do SEPAPM, é possível concluir que a corrente apresentava um sentido de maré vazante. Ao longo do tempo este vetor foi completando seu giro horário, de forma que ocorreu uma transição para a maré enchente, por volta de uma hora e meia de fundeio (estofa de vazante). Após o período de enchente, houve uma brusca mudança de sentido para a maré vazante, por volta das sete horas e meia de fundeio (estofa de enchente). Estes dois momentos de inversão nos sentidos do vetor velocidade podem ser associados aos seus menores valores de magnitude (Figura 19a). E as correntes mantiveram este sentido até o término da coleta de dados. Pode-se observar que as correntes apresentaram dois sentidos predominantes, o noroeste e o sudoeste, relativos aos períodos de enchente e vazante, respectivamente.

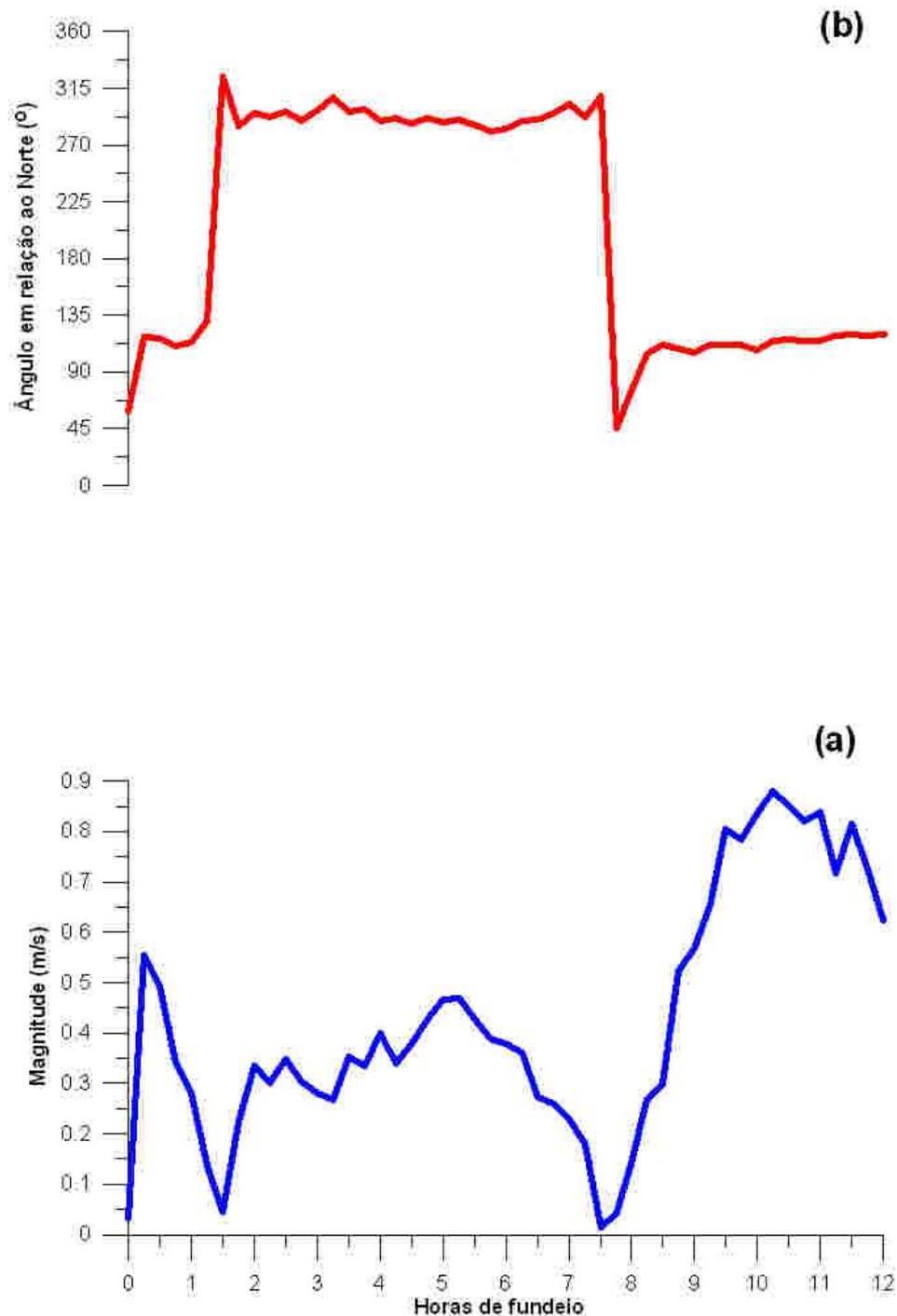


Figura 19: Magnitude (m/s) (a) e sentido (graus a partir do Norte - Rosa dos Ventos) (b) dos vetores de velocidade de corrente, relativos ao local de fundeio do *Aquadopp* (Ponto P1 da Figura 11).

A análise da Figura 19 indica que as maiores magnitudes do vetor velocidade são observadas nos períodos de maré vazante, com um valor máximo de 0,880 m/s. Essa assimetria de velocidades é reforçada quando se observa que o maior valor relativo ao sentido da maré enchente (0,468 m/s) representa pouco mais da metade

daquela magnitude. Também se pode observar que as correntes permaneceram no sentido vazante por um período menor (5,5 horas) quando comparado ao período de maré enchente (7,5 horas). Revelando assim uma considerável assimetria temporal das correntes de maré. Portanto, com base nestes dados, é de se esperar que o local de fundeio do *Aquadopp* apresente um vetor resultante orientado no sentido da maré vazante.

Ao somar a média do sentido Leste com a do sentido Oeste, a componente Leste-Oeste apresentou um valor resultante positivo de 0,2070 m/s, indicando uma componente Leste para o vetor resultante. O somatório das médias na componente Norte-Sul gerou um valor negativo de 0,1412, ou seja, a outra componente do vetor resultante possui um sentido Sul. Desta maneira o vetor resultante das velocidades das correntes apresenta um sentido sudeste ($124,30^\circ$), com uma magnitude de 0,2506 m/s. Portanto, o canal de acesso ao SEPAPM apresentou um domínio da maré vazante.

A orientação do canal de acesso ao SEPAPM (sentido Leste - Oeste), associada à presença do banco arenoso ao Norte do local de fundeio do *Aquadopp* (Ponto P1 na Figura 11), atuando como uma barreira ao escoamento neste sentido pode ter contribuído para a orientação resultante das correntes de maré.

5.1.1.2 Dados do fundeio sobre o banco arenoso (ADP - Argonaut)

Os dados obtidos com o perfilador de velocidades *Argonaut* abrangem um período de 10,75 horas do comportamento das correntes de maré sobre o banco arenoso da desembocadura do SEPAPM (Figura 20).

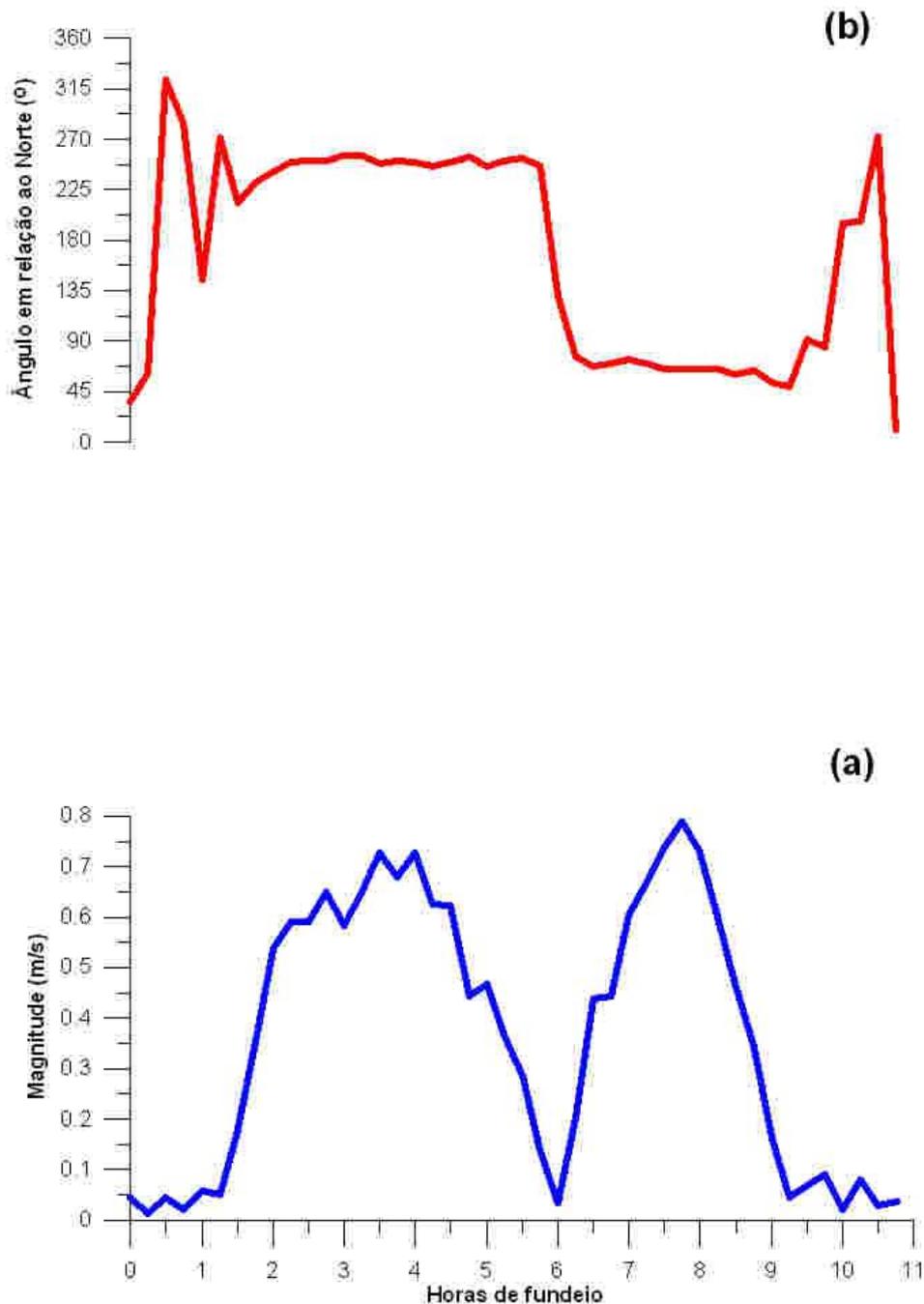


Figura 20: Magnitude (m/s) (a) e sentido (graus a partir do Norte - Rosa dos Ventos) (b) dos vetores de velocidade de corrente, relativos ao local de fundeio do *Argonaut* (Ponto P2 da Figura 11).

A partir da Figura 20b, percebe-se que no início do fundeio o vetor das correntes apresentou sentidos muito variáveis, e somente por volta de uma hora e meia de fundeio foi possível observar um sentido predominante para Sudoeste/Oeste. Quando se observa a orientação do canal sobre o banco arenoso, onde foi fundeado o *Argonaut* (Figura 11), percebe-se que ela corresponde a um sentido aproximado Nordeste - Sudoeste. Portanto, o fundeio começou com uma estofa de maré vazante, seguida de correntes de maré enchente. A estofa de maré enchente foi

verificada por volta das seis horas de fundeio (Figura 20a). De forma que a partir deste horário, os vetores apresentaram um sentido predominante para Nordeste/Leste, permanecendo nesta orientação até pouco mais de nove horas de fundeio. Em seguida, observou-se novamente grande variação no sentido dos vetores de velocidade, associada às menores magnitudes, até o final do fundeio. O que permite deduzir um novo momento de estufa de maré vazante. Desta forma, podem-se observar dois sentidos predominantes, Sudoeste/Oeste e Nordeste/Leste, associados às correntes de maré enchente e vazante, respectivamente.

A análise da Figura 20 indica que as magnitudes do vetor velocidade foram equivalentes nos dois sentidos das correntes de maré. Sendo que, comparando-se os valores máximos de magnitude, observa-se uma ligeira superioridade do valor da maré vazante (0,788 m/s) com relação àquele do período de maré enchente (0,728 m/s). Desta forma, não foi possível observar uma nítida assimetria de velocidades, como aquela relativa ao fundeio do *Aquadopp* (Figura 19). Entretanto, ao longo do fundeio, observou-se que o período em que o vetor velocidade estava orientado no sentido da maré enchente (6,5 horas) foi maior do que aquele relativo ao sentido da maré vazante (4,25 horas). Portanto, também se observa uma considerável assimetria temporal das correntes de maré. Contudo, é necessária uma análise mais detalhada das componentes do vetor velocidade, para se obter uma estimativa do domínio das correntes de maré no local de fundeio do *Argonaut*.

Após somar a média do sentido Leste com a do sentido Oeste, a componente Leste-Oeste apresentou um valor resultante negativo de 0,0624 m/s, indicando uma componente Oeste para o vetor resultante. O somatório das médias na componente Norte-Sul também gerou um valor negativo, equivalendo a 0,0294, ou seja, a outra componente do vetor resultante possui um sentido Sul. Comparando-se estes resultados com aqueles relativos ao fundeio do *Aquadopp*, percebe-se que uma ordem de grandeza de diferença entre as respectivas componentes. Isto pode ser compreendido, uma vez que não foi observado um predomínio de determinado sentido em cada componente, no caso do *Argonaut*. De posse destas duas componentes resultantes, obtêm-se um vetor resultante das velocidades das correntes com sentido sudoeste ($244,78^\circ$) e magnitude de 0,0689 m/s. Portanto, o local de fundeio do *Argonaut* (Ponto P2 na Figura 11) apresentou um domínio da maré enchente. A orientação deste canal (sentido Nordeste - Sudoeste) sobre o

banco arenoso parece ter atuando como uma canalização, ou uma barreira ao escoamento em sentidos diferentes.

5.1.1.3 Dados do fundeio sobre o banco arenoso (ADV)

Este equipamento também adquiriu os dados do comportamento da maré sobre o banco arenoso, porém próximo à praia estuarina do setor norte da desembocadura, por um período de 8,75 horas (Figura 21).

Analisando a Figura 21b, pode-se perceber que ao longo do fundeio o vetor das correntes apresentou dois sentidos predominantes, um para sudoeste e outro para nordeste, como foi observado no fundeio do *Argonaut*. Como a praia estuarina apresenta uma orientação semelhante ao canal sobre o banco (Figura 11), estes sentidos dos vetores podem também ser relacionados às correntes de maré enchente e vazante, respectivamente. Desta forma, o fundeio teve início com a maré enchente, e somente por volta de cinco horas de fundeio foi observada uma inversão no sentido do vetor. Neste horário se observa a estofa da maré enchente, marcada pelo valor nulo da magnitude (Figura 21a), ocorrendo então uma mudança no sentido para nordeste. O vetor manteve esta orientação até cerca de oito horas e meia de fundeio, aonde se observou a estofa de maré vazante, menor valor seguinte registrado.

Pelas Figuras 20 e 21, percebe-se que sobre o banco arenoso as magnitudes do vetor velocidade apresentam certa equivalência nos dois sentidos das correntes de maré, ao contrário do que ocorre no canal de acesso ao SEPAPM. Comparando-se os valores máximos de magnitude na Figura 21, também é possível observar uma discreta superioridade entre as velocidades máximas das correntes de maré. Todavia, neste fundeio, àquela relacionada à maré enchente (0,4196 m/s) supera a velocidade máxima da maré vazante (0,4020 m/s). Desta forma, também não foi possível observar uma nítida assimetria de velocidades. No decorrer do fundeio, a maré apresentou uma assimetria temporal no sentido vazante, uma vez que o tempo em que as correntes permaneceram neste sentido (3,5 horas) foi inferior ao sentido oposto (5,25 horas). Contudo, também se faz necessária uma análise mais detalhada das componentes do vetor velocidade, para se obter um vetor resultante do local de fundeio do *Triton*.

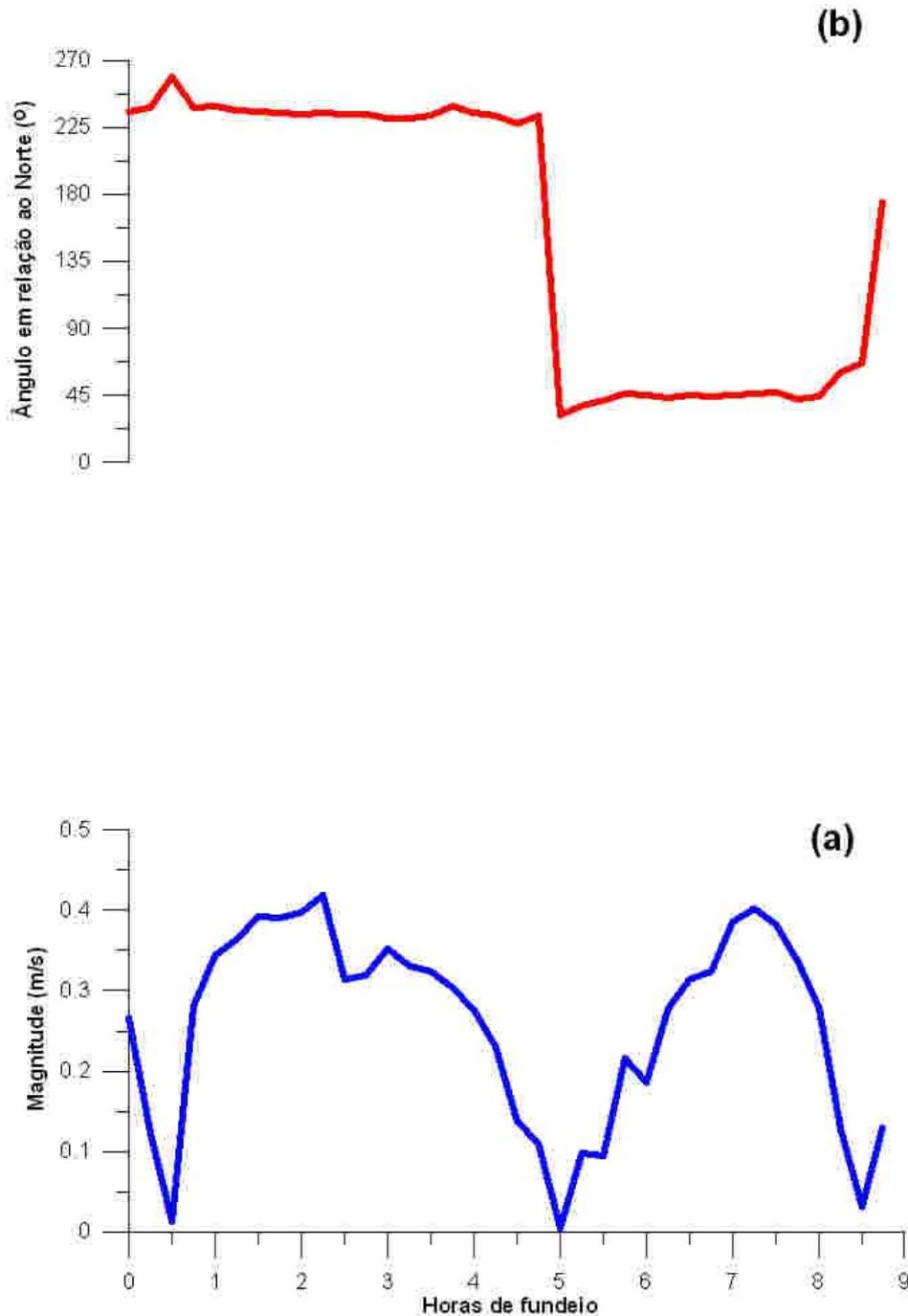


Figura 21: Magnitude (m/s) (a) e sentido (graus a partir do Norte - Rosa dos Ventos) (b) dos vetores de velocidade de corrente, relativos ao local de fundeio do *Triton* (Ponto P3 da Figura 11).

Após somar a média do sentido Leste com a do sentido Oeste, a componente Leste-Oeste apresentou um valor resultante negativo de 0,0177 m/s, indicando uma componente Oeste para o vetor resultante. O somatório das médias na componente Norte-Sul também gerou um valor negativo, equivalendo a 0,0406, ou seja, a outra componente do vetor resultante possui um sentido Sul. Observam-se orientações

resultantes bem semelhantes às correspondentes do *Argonaut*. Foi observada uma nítida limitação das componentes Leste-Oeste, em termos de magnitude, uma vez que as componentes Norte-Sul apresentaram valores com uma ordem de magnitude superior. Isto pode estar associado ao fato de o *Triton* ter sido fundeado entre o banco arenoso e a praia estuarina, o que limitaria o desenvolvimento do escoamento ao longo do eixo Leste-Oeste. Estas duas componentes resultantes fornecem um vetor resultante das velocidades das correntes orientado para sudoeste ($203,59^\circ$), com uma magnitude de $0,0443$ m/s. Desta forma, o local de fundeio do *Triton* (Ponto P3 na Figura 11) apresentou um domínio da maré enchente.

As características dos vetores de velocidade de correntes resultantes, nos três fundeios, são sumarizadas na Tabela 6. De uma maneira geral, a desembocadura do SEPAPM é caracterizada pelo domínio marcante da maré vazante em seu canal de acesso. Pode-se verificar isso através da comparação entre as magnitudes dos vetores resultantes. O local de fundeio do *Aquadopp* (P1) apresentou uma magnitude quase seis vezes superior àquela observada no local de fundeio do *Triton* (P3). Com relação ao local de fundeio do *Argonaut* (P2), sua magnitude foi quase cinco vezes maior. Já os fundeios sobre o banco arenoso não apresentaram um domínio nítido da maré, embora tenha se observado que ambos os valores apresentam uma orientação de maré enchente. Desta forma, pode-se observar uma célula de circulação resultante, associada aos três pontos de coleta de dados hidrodinâmicos. A magnitude resultante associada ao fundeio do *Argonaut* é ligeiramente superior àquela relativa ao fundeio do *Triton*, o que pode estar associado a uma posição mais abrigada do ADV. Outro fator que poderia influenciar nos padrões é o fato de o *Argonaut* ter sido fundeado em Março, ou seja, um período em que as correntes de maré são geralmente maiores do que aquelas observadas em Julho. Isto ocorre devido à maior proximidade da Terra em relação ao Sol, neste período do ano; o que gera um incremento nas forças causadoras das marés, uma vez que esta é inversamente proporcional ao cubo da distância entre os dois corpos (OPEN UNIVERSITY). Pode-se notar esta diferença sazonal comparando-se as magnitudes das velocidades apresentadas nas Figuras 19 e 21, por exemplo.

Tabela 6: As magnitudes (m/s) e o ângulo (graus em relação ao Norte – Rosa dos Ventos) dos vetores resultantes, relativos às correntes medidas nos três fundeios realizados.

Equipamentos	<i>Triton</i>	<i>Argonaut</i>	<i>Aquadopp</i>
Magnitude	0,0443	0,0689	0,2506
Ângulo	203,59°	244,78°	124,30°

5.1.2 Calibração do Modelo de Transporte de Sedimentos Sedtrans05.

Na Tabela 7 são mostrados os valores de massa total, massa resultante e, a porcentagem de material orgânico presente nas amostras retidas na armadilha de sedimentos, relativas aos momentos de sizígia e de quadratura. Assim como os valores de D50 e as médias relacionadas ao peneiramento das amostras resultantes, calculados no software *GRADSTAT*.

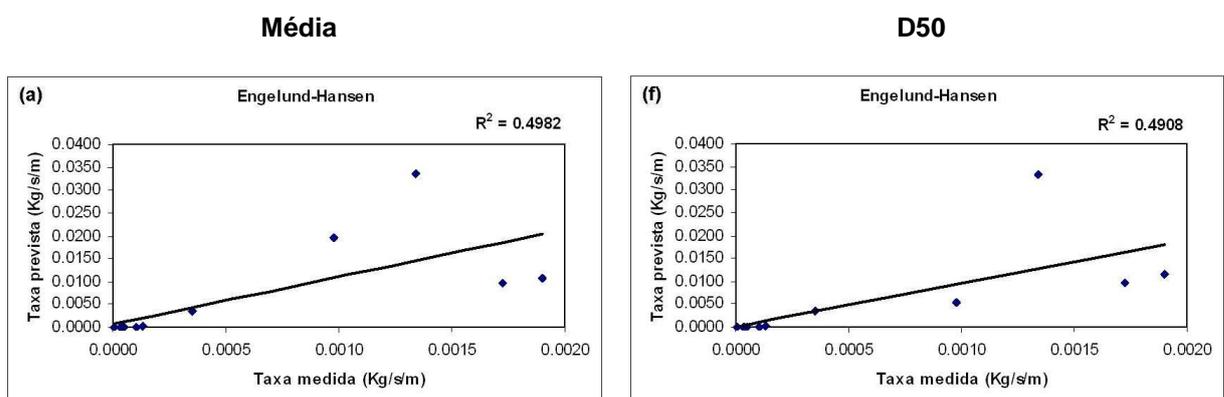
As análises do teor de CaCO_3 das amostras de sedimentos coletadas nas regiões de crista e de cava das formas de fundo próximas ao *Triton* (P3), nos campos de quadratura e de sizígia, mostraram que em média, a assembléia de sedimentos local apresentou uma superioridade em sedimentos carbonáticos (mais de 50 % de CaCO_3). Desta forma, fez-se necessária uma análise da influência da massa específica do sedimento, considerada pelo modelo, no resultado final da calibração. O principal componente dos sedimentos carbonáticos é o mineral Calcita, cuja massa específica equivale a 2720 Kg/m^3 (Schlager, 2005). Utilizando este valor para a massa específica dos sedimentos, foi observada a mesma tendência de correlação entre as taxas medidas e aquelas previstas. Porém, observou-se que as taxas previstas utilizando sedimentos carbonáticos apresentaram maior subestimação das taxas *in situ*, do que as taxas previstas utilizando sedimentos constituídos do mineral quartzo. Desta forma, serão apresentados os valores referentes às taxas previstas utilizando a massa específica relativa a este mineral, com um valor igual a 2650 Kg/m^3 .

Após os cálculos das taxas de transporte pelo Sedtrans05, observou-se que alguns horários da quadratura (08, 14, 15, 16 e 17 horas) não apresentaram transporte de sedimentos, e dessa forma não puderam ser utilizados como taxa prevista para comparação com a taxa *in situ*. Assim, a calibração do Sedtrans05 utilizou 12 dados de taxa de transporte *in situ*.

Tabela 7: Porcentagem de matéria orgânica (MO) e, massa total (T) e resultante (R – sem material orgânico) (em gramas) das amostras de sedimentos coletadas com o amostrador de carga de fundo, durante a sizígia e a quadratura.

Horário	Quadratura					Sizígia				
	Massa (g)		Teor de MO (%)	D50 (µm)	Média (µm)	Massa (g)		Teor de MO (%)	D50 (µm)	Média (µm)
	T	R				T	R			
08	0,4223	0,0245	94,20	225,73	216,07	-	-	-	-	-
09	0,0725	0,0128	82,34	172,50	155,13	-	-	-	-	-
10	0,5306	0,1043	80,34	239,76	232,97	-	-	-	-	-
11	0,4590	0,0464	89,89	256,47	272,45	-	-	-	-	-
12	0,6303	0,0568	90,99	232,35	247,73	0,4516	0,1364	69,80	167,49	185,53
13	1,3384	0,1242	90,72	248,45	269,11	24,9838	0,5457	91,48	109,63	122,06
14	0,9693	0,0775	92,00	263,41	230,74	17,5894	1,0519	75,89	120,16	118,08
15	1,8355	0,0752	95,90	344,25	376,41	22,6428	0,6144	87,55	199,99	194,78
16	0,1944	0,0533	72,58	240,73	268,59	4,6296	0,3926	91,52	237,96	237,77
17	0,1561	0,0139	91,10	195,17	194,21	1,6990	0,6506	61,71	159,20	129,11
18	-	-	-	-	-	12,8224	3,6849	42,25	69,65	45,83

Foram comparadas as taxas previstas pelas equações do Sedtrans05 (assumindo como granulometria os valores de D50 ou as médias, ambos em metros), e aquelas obtidas *in situ*, utilizando a massa total (Figura 22) ou a massa resultante (Figura 23), ambas em quilogramas.



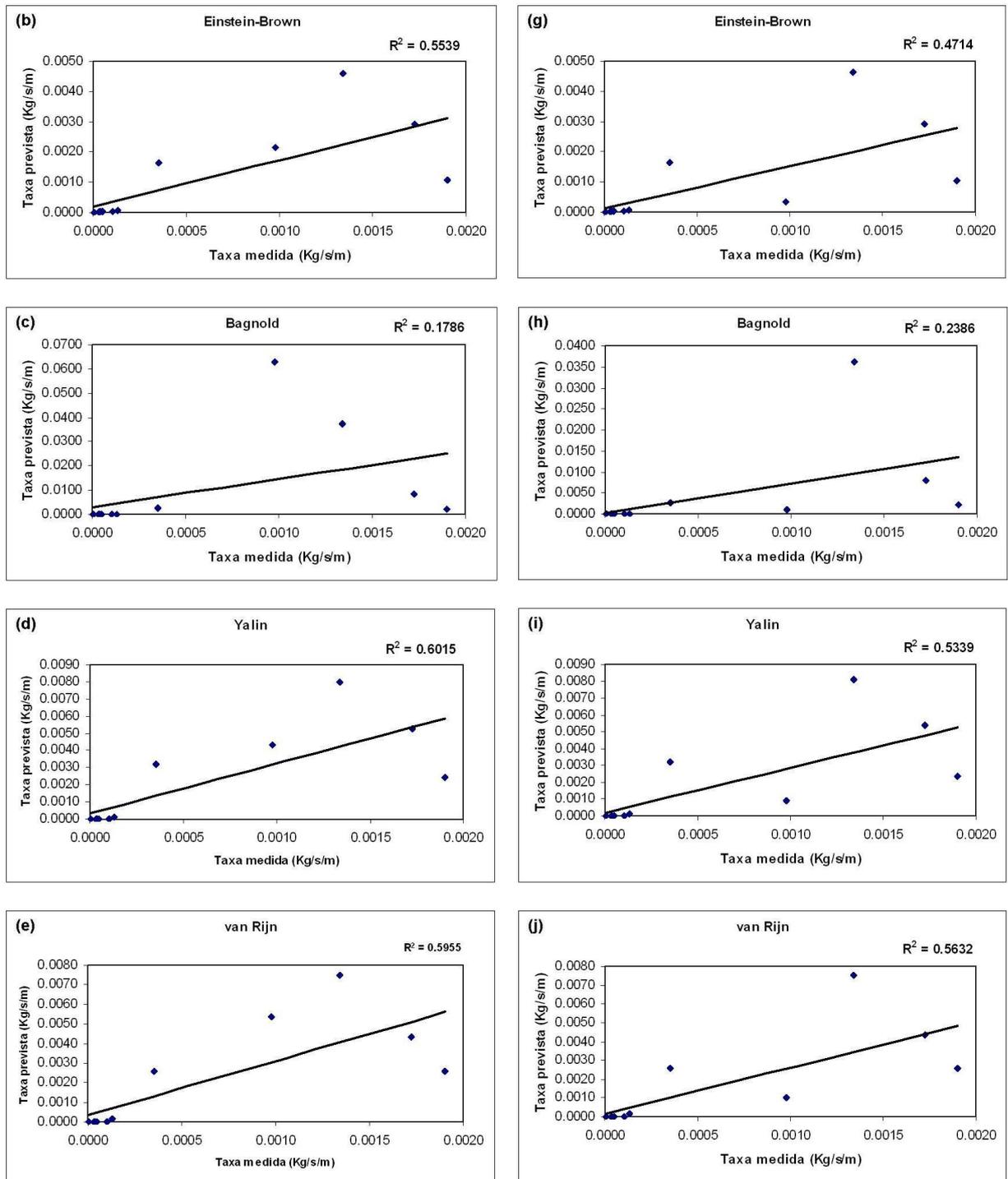
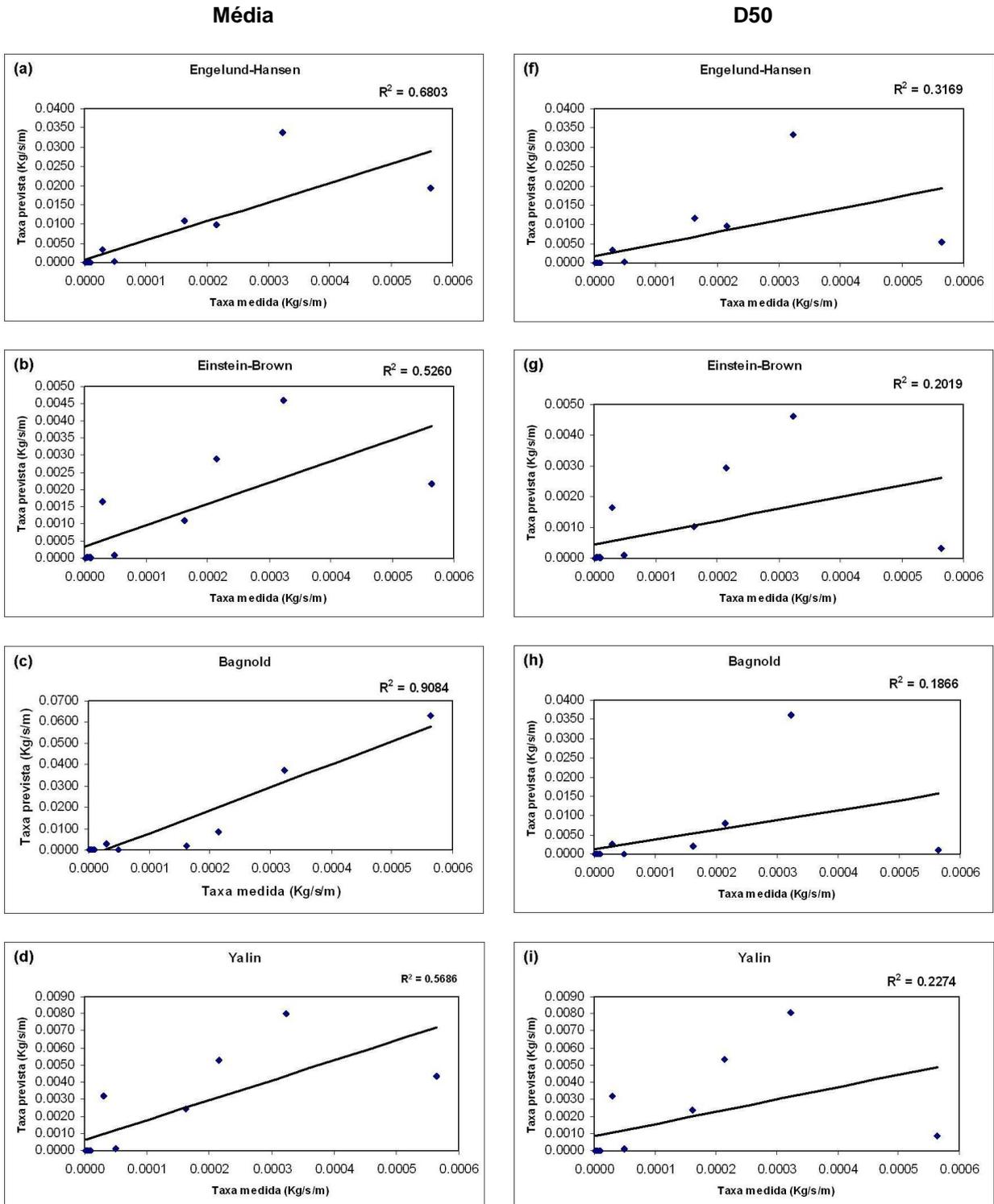


Figura 22: Gráficos comparativos entre as taxas de transporte medidas *in situ* (com a massa total da amostra) e as taxas previstas pelo modelo Sedtrans05. Os cálculos foram feitos utilizando ou a média (coluna à esquerda) ou o D50 (coluna à direita). (a & f) Equação de carga total de Engelund-Hansen; (b & g) Equação de carga de fundo de Einstein-Brown; (c & h) Equação de carga total de Bagnold; (d & i) Equação de carga de fundo de Yalin; (e & j) Equação de carga de fundo de van Rijn.

A Tabela 8 fornece os dados dos coeficientes de determinação (R^2) relativos às comparações entre as taxas previstas pelas equações do Sedtrans05 e aquelas

obtidas *in situ*, utilizando a massa total ou a massa resultante (em quilogramas) e, os valores de D50 ou as médias (em metros), ambos mostradas nas Figuras 22 e 23.



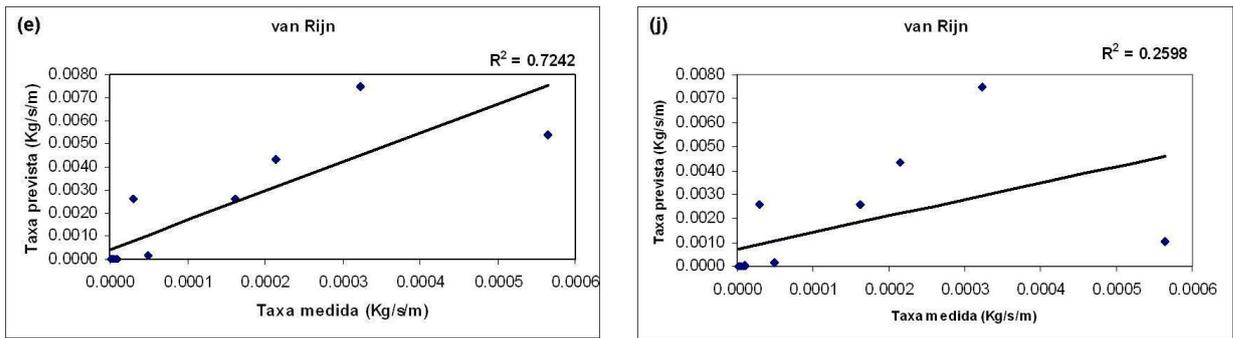


Figura 23: Gráficos comparativos entre as taxas de transporte medidas *in situ* (com a massa resultante da amostra) e as taxas previstas pelo modelo Sedtrans05. Os cálculos foram feitos utilizando ou a média (coluna à esquerda) ou o D50 (coluna à direita). (a & f) Equação de carga total de Engelund-Hansen; (b & g) Equação de carga de fundo de Einstein-Brown; (c & h) Equação de carga total de Bagnold; (d & i) Equação de carga de fundo de Yalin; (e & j) Equação de carga de fundo de van Rijn.

Tabela 8: Comparação entre as taxas de transporte de sedimentos previstas pelo Sedtrans05 e aquelas obtidas *in situ*, utilizando coeficiente de determinação (R^2). As duas melhores correlações estão destacadas.

Equação do Sedtrans05	Massa Total		Massa Resultante	
	D50	Média	D50	Média
Engelund-Hansen	0,4908	0,4982	0,3169	0,6830
Einstein-Brown	0,4714	0,5539	0,2019	0,5260
Bagnold	0,2386	0,1786	0,1866	0,9084
Yalin	0,5339	0,6015	0,2274	0,5686
van Rijn	0,5632	0,5955	0,2598	0,7242

A partir das comparações entre as previsões do modelo e as taxas medidas (Tabela 8) percebe-se que a situação em que ocorreu a maior correlação foi aquela em que foi comparada a taxa *in situ*, utilizando a massa resultante, com a taxa prevista pela equação de Bagnold, considerando a granulometria como a média das amostras de sedimentos. Desta forma, os resultados de modelagem de transporte de sedimentos apresentados a seguir, nos locais de fundeio dos ADPs e do ADV, são baseados nesta equação, utilizando a média como uma estimativa de granulometria.

5.1.3 Taxas de Transporte de Sedimentos na Desembocadura do SEPAPM

Uma vez definida a equação de transporte de sedimentos a ser utilizada no modelo Sedtrans05, a seguir são mostrados os padrões temporais dos vetores de taxa de transporte de sedimentos, nos locais de fundeio dos ADPs e do ADV.

5.1.3.1 Local de Fundeio do Aquadopp

Assim como no caso do *Argonaut*, este equipamento não coletou dados relativos às ondas (altura, período e direção), e sendo assim, as taxas de transporte estão associadas às condições hidrodinâmicas relativas aos parâmetros de entrada das correntes locais (magnitudes e sentidos). A Figura 24 mostra a variação temporal da magnitude (a) e do ângulo (b) (Rosa dos Ventos) dos vetores de taxas de transporte de sedimentos, ao longo do período de fundeio do *Aquadopp*. No ponto P1, foi observada uma granulometria equivalente à areia grossa (Wentworth, 1922), com média igual a 0,525 mm.

Pode-se observar que durante o período de fundeio os vetores das taxas de transporte apresentaram dois sentidos predominantes, sudeste e noroeste, aproximadamente (Figura 24b), correspondentes aos sentidos das correntes de maré vazante e enchente, respectivamente. Analisando-se a Figura 24, pode-se observar que as magnitudes dos vetores de taxa de transporte orientados para a maré vazante atingem os maiores valores, e predominam ao longo do fundeio. Enquanto os vetores relativos às correntes de maré enchente são pouco expressivos, e ocorrem em poucos momentos do fundeio.

Ao somar a média do sentido Leste com a do sentido Oeste, a componente Leste-Oeste apresentou um valor resultante positivo de 0,1555 m/s, indicando uma componente Leste para o vetor resultante. O somatório das médias na componente Norte-Sul gerou um valor negativo de 0,0700, ou seja, a outra componente do vetor resultante possui um sentido Sul. O predomínio destes dois sentidos dos vetores de taxas de transporte mostrou-se preponderante, sendo que a componente Leste apresentou os maiores valores ao longo do fundeio. Desta maneira o vetor resultante das taxas de transporte de sedimentos apresenta um sentido Leste-Sudeste ($114,24^\circ$), com uma magnitude de 0,1705 Kg/s/m. O que corresponde a um

transporte líquido de sedimentos no sentido da maré vazante. Esta orientação é condizente com as assimetrias das correntes de maré observadas no local e com o vetor de velocidade de correntes resultantes.

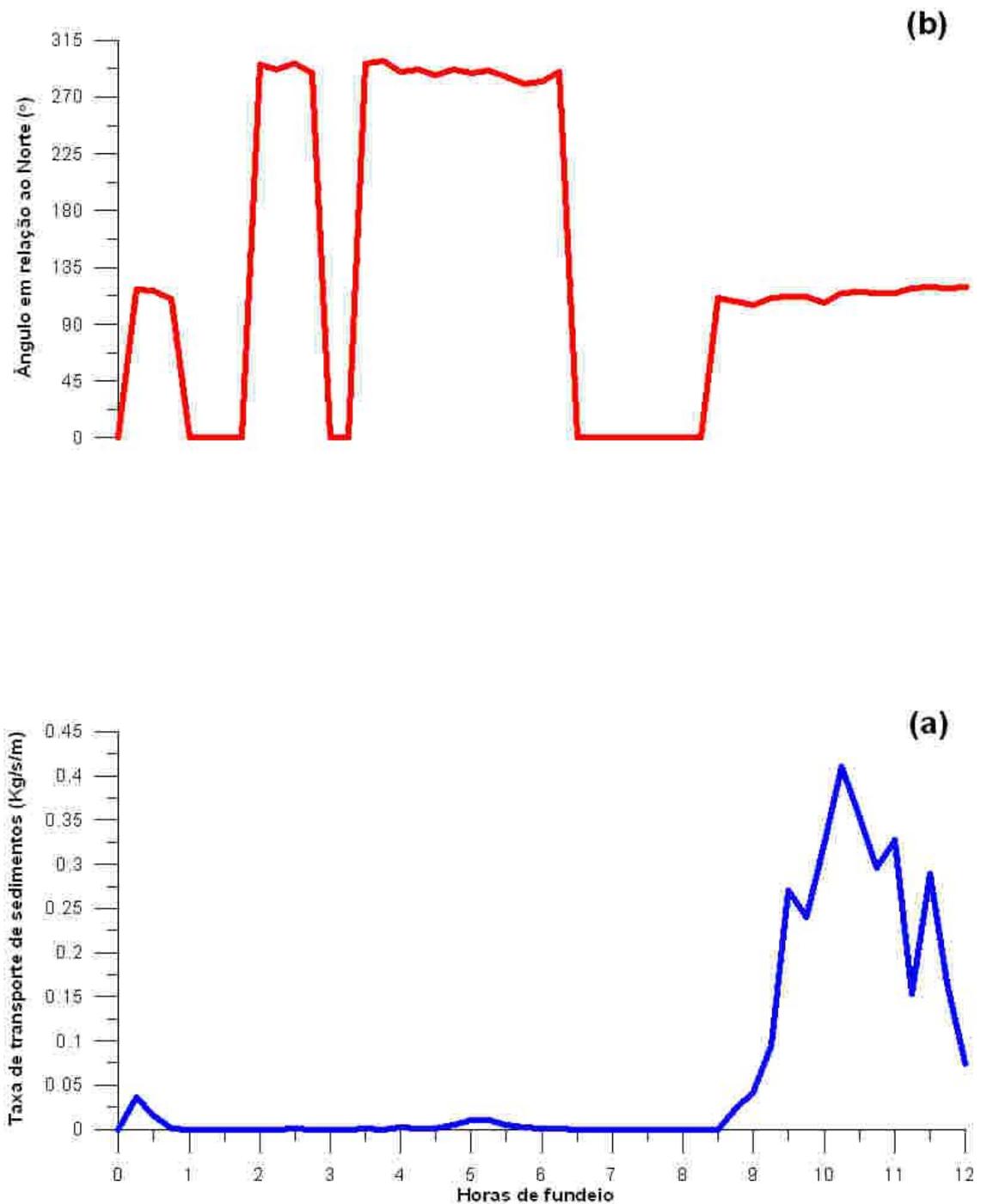


Figura 24: Magnitude (Kg/s/m) (a) e sentido (graus a partir do Norte - Rosa dos Ventos) (b) dos vetores de taxa de transporte de sedimentos, relativos ao local de fundeio do *Aquadopp* (Ponto P1 da Figura 11).

5.1.3.2 Local de Fundeio do Argonaut

A Figura 25 mostra a variação temporal da magnitude (a) e do ângulo (b) (Rosa dos Ventos) dos vetores de taxas de transporte de sedimentos, ao longo do período de fundeio do *Argonaut*. Analisando-se esta figura, verifica-se que as taxas de transporte nos sentidos vazante (Nordeste) e enchente (Sudoeste) foram equivalentes, embora as taxas relativas à maré vazante tenham alcançado valores relativamente maiores. No ponto P2, foi observada uma granulometria equivalente à areia média (Wentworth, 1922), com média igual a 0,341 mm.

Após somar a média do sentido Leste com a do sentido Oeste, a componente Leste-Oeste apresentou um valor resultante positivo de 0,0099 m/s, indicando uma componente Leste para o vetor resultante. O somatório das médias na componente Norte-Sul também gerou um valor positivo, equivalendo a 0,0151, ou seja, a outra componente do vetor resultante possui um sentido Norte. Acompanhando o padrão das velocidades de correntes, a comparação entre estes resultados e aqueles relativos ao fundeio do *Aquadopp*, revela uma considerável diferença entre as respectivas componentes. Com estas duas componentes resultantes, obtêm-se um vetor resultante das taxas de transporte de sedimentos com sentido Nordeste ($33,31^\circ$) e magnitude de 0,0180 Kg/s/m. Portanto, houve um transporte líquido de sedimentos no sentido da maré vazante. Uma orientação contrária à observada para o vetor resultante de velocidade das correntes, ou seja, um domínio da maré enchente. Em comparação aos sentidos contrários, os vetores de taxa de transporte com sentidos Leste e Norte apresentam magnitudes maiores, ocorrendo em intervalos de tempo menores, garantindo uma maior contribuição destes sentidos no vetor resultante.

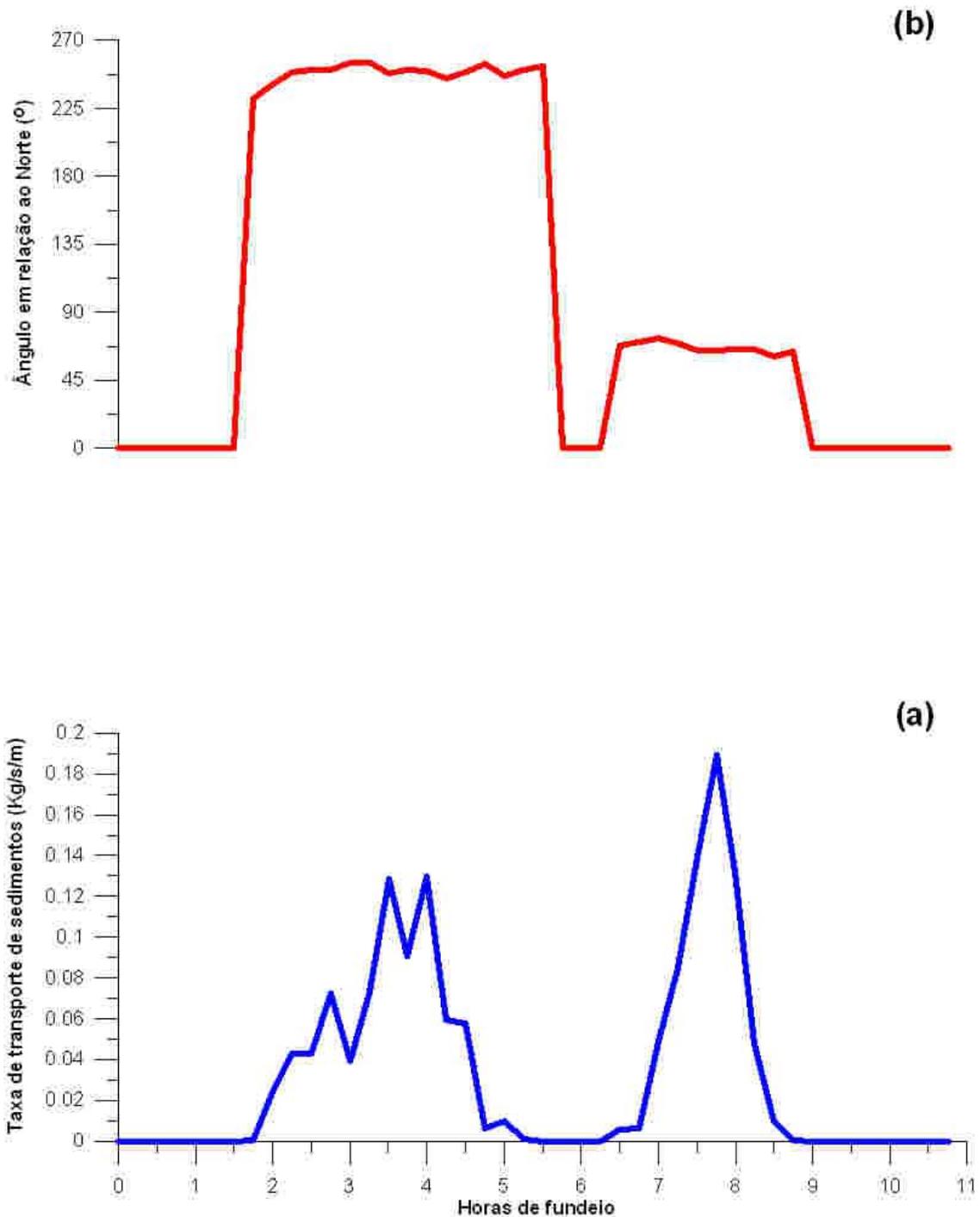


Figura 25: Magnitude (Kg/s/m) (a) e sentido (graus a partir do Norte - Rosa dos Ventos) (b) dos vetores de taxa de transporte de sedimentos, relativos ao local de fundeio do *Argonaut* (Ponto P2 da Figura 11).

5.1.3.3 Local de Fundeio do Triton

Com este equipamento foi possível obter dados relativos às ondas (altura e período) e às correntes, sendo então realizado o cálculo do transporte conjugado. A Figura 26 mostra a variação temporal da magnitude (a) e do ângulo (b) (Rosa dos Ventos) dos vetores de taxas de transporte de sedimentos, ao longo do período de fundeio do

Triton. Analisando-se esta figura, nota-se que as taxas de transporte que ocorrem no sentido da maré enchente (Sudoeste) prevalecem ao longo do fundeio. Enquanto as taxas relativas à maré vazante (Nordeste) foram pouco freqüentes, porem apresentaram grandes magnitudes. No ponto P3, a granulometria variou ao longo do fundeio, pois os valores inseridos remetem àqueles obtidos do peneiramento das amostras coletadas a cada hora. Estes valores foram mostrados na Tabela 7, e pode-se observar uma granulometria predominantemente equivalente à areia média, embora também tenha sido observada a presença de areia fina (Wentworth, 1922).

Após somar a média do sentido Leste com a do sentido Oeste, a componente Leste-Oeste apresentou um valor resultante positivo de 0,0156 m/s, indicando uma componente Leste para o vetor resultante. O somatório das médias na componente Norte-Sul também gerou um valor positivo, equivalendo a 0,0150, ou seja, a outra componente do vetor resultante possui um sentido Norte. Assim como ocorreu com o vetor resultante de velocidades de corrente, Observam-se orientações resultantes bem semelhantes às componentes do *Argonaut*. Apesar de os sentidos Norte e Leste não serem predominantes ao longo do fundeio, suas intensidades foram determinantes na orientação do vetor resultante de taxas de transporte de sedimentos. Estas componentes configuram um vetor resultante orientado para Nordeste (46,02°), com uma magnitude de 0,0217Kg/s/m. Assim como ocorreu no fundeio do *Argonaut*, observa-se um vetor resultante de taxas de transporte de sedimentos orientado no sentido da maré vazante, estando oposto ao vetor resultante das velocidades das correntes. No caso do ADV *Triton*, a taxa resultante remete apenas aos horários em que foram obtidos os dados de taxas *in situ*, ou seja, aqueles em que também foram inseridos no modelo Sedtrans05 os parâmetros de onda. Sendo que estes estavam espaçados de hora em hora. De forma que a duração total foi inferior àquela em que foi obtido o vetor resultante das velocidades das correntes. A modelagem de transporte de sedimentos pelo Sedtrans05, utilizando apenas parâmetros hidrodinâmicos relativos às correntes também foi realizada, mas foram observadas taxas de transporte de sedimentos nulas.

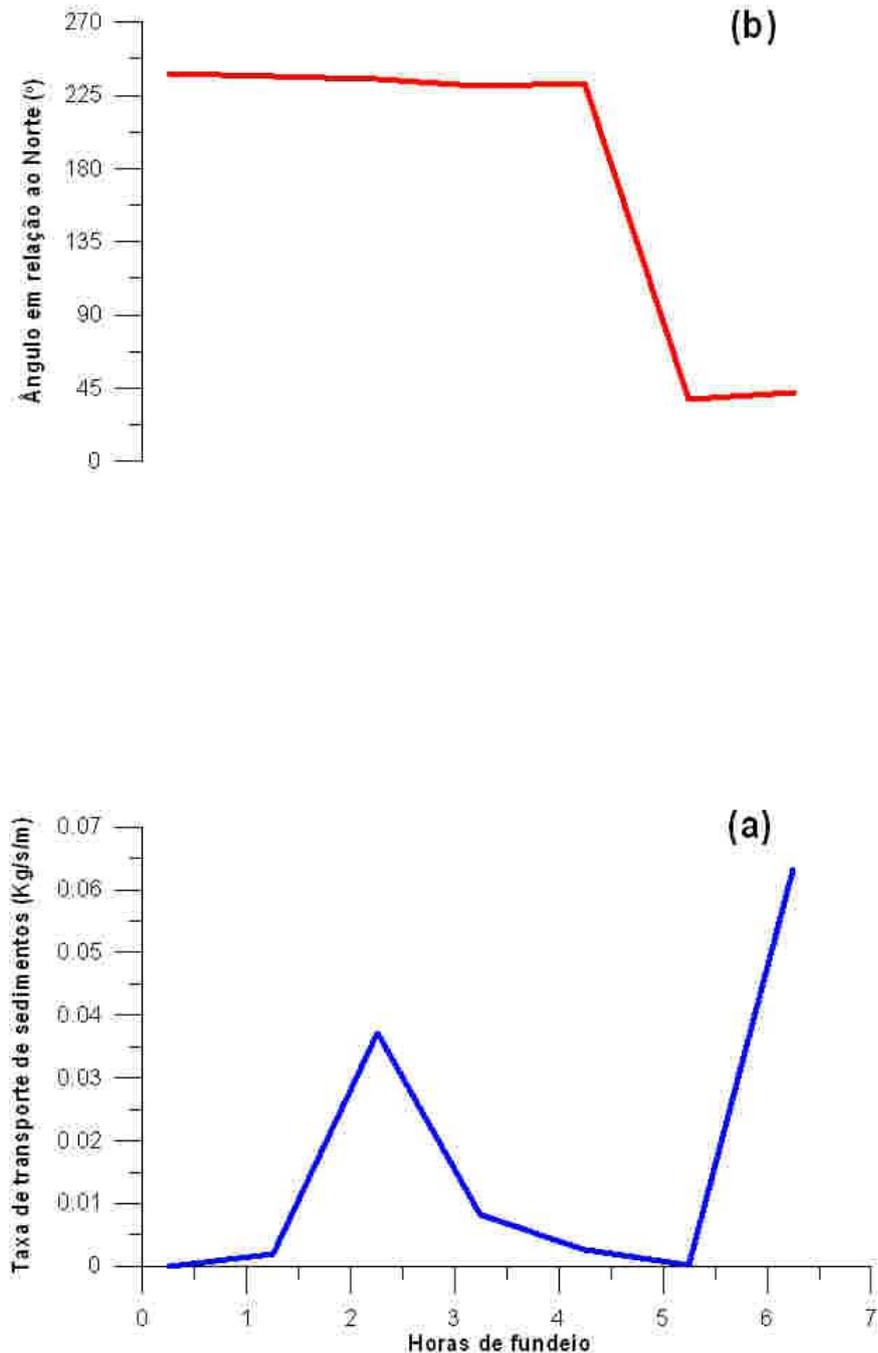


Figura 26: Magnitude (Kg/s/m) (a) e sentido (graus a partir do Norte - Rosa dos Ventos) (b) dos vetores de taxa de transporte de sedimentos, relativos ao local de fundeio do *Triton* (Ponto P3 da Figura 11).

As características dos três vetores resultantes de taxas de transporte de sedimentos dos fundeios são apresentadas na Tabela 9. De uma maneira geral, foi observado um transporte líquido de sedimentos no sentido da maré vazante na desembocadura do SEPAPM. Os valores de taxas resultantes de transporte de sedimento (em Kg/s/m) revelam valores de transporte no canal de acesso ao SEPAPM quase dez vezes superiores aos observados sobre o banco arenoso.

Tabela 9: As magnitudes (Kg/s/m) e o ângulo (Rosa dos ventos) dos vetores resultantes de taxas de transporte de sedimentos, nos três fundeios realizados.

Equipamentos	<i>Triton (P3)</i>	<i>Argonaut (P2)</i>	<i>Aquadop (P1)</i>
Magnitude	0,0217	0,0180	0,1705
Ângulo (°)	46,02	33,31	114,24

Por fim, estes vetores resultantes puderam ser agrupados em um único mapa, para uma melhor visualização do padrão de transporte de sedimentos, em momentos de sizígia, da desembocadura do SEPAPM. Como a magnitude do vetor relativo ao ponto de fundeio do *Aquadop (P1)* é muito superior a dos demais, foi necessário agrupá-los de forma proporcional, para uma melhor visualização (Figura 27). Desta forma, as magnitudes resultantes plotadas correspondem a uma raiz quadrada, relativa às razões entre as magnitudes dos vetores e a menor magnitude (P2).

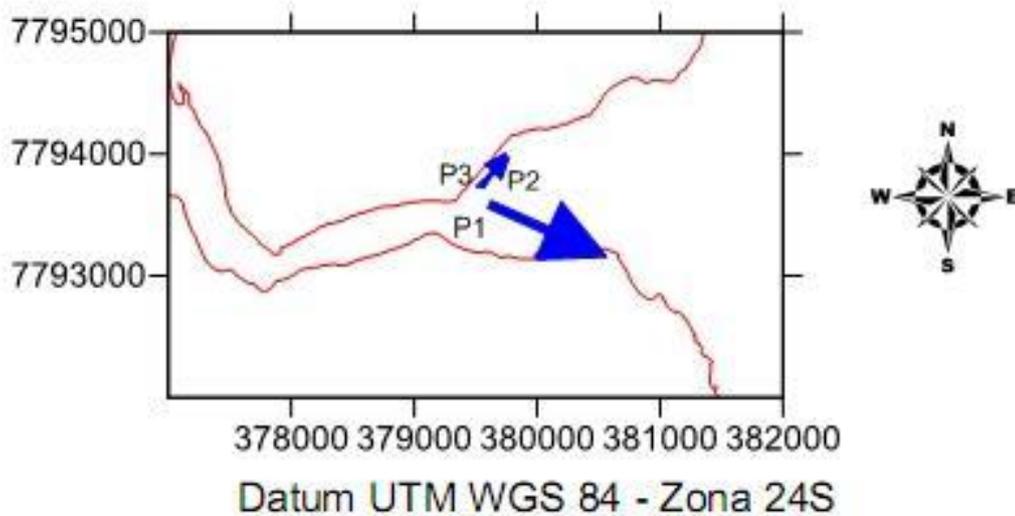


Figura 27: Magnitude e sentido dos vetores resultantes de taxas de transporte de sedimentos. As magnitudes são proporcionais ao menor valor (P2).

A modelagem do transporte de sedimentos é um processo complexo em função do grande número de variáveis envolvidas, que devem ser levadas em consideração para a obtenção de estimativas mais precisas. Desta forma, faz-se necessária uma discussão das limitações e dos possíveis erros associados à modelagem realizada na desembocadura do SEPAPM.

Um fator diretamente relacionado aos resultados obtidos, não só em termos de taxas de transporte de sedimentos modeladas, é o fato de terem sido feitas comparações entre valores relativos a diferentes condições hidrodinâmicas da desembocadura do SEPAPM. A situação ideal de estudo seria aquela em que os três fundeios tivessem sido realizados no mesmo dia. De forma que os resultados encontrados remetessem às mesmas condições ambientais, em que as variáveis modeladas seriam correspondentes, em termos de variação sazonal.

Infelizmente, os três fundeios não apresentaram a mesma duração, devido a fatores logísticos, envolvendo luz natural, e questões de segurança de pessoas e de equipamentos envolvidos nos campos. Aparentemente, os valores resultantes de taxas de transporte obtidos não estão em uma escala temporal que permita uma comparação confiável. Entretanto, conforme observado em campo, durante os períodos em que os equipamentos foram fundeados sobre o banco arenoso, foi possível coletar os dados relativos às condições hidrodinâmicas mais intensas dos respectivos ciclos de maré. Desta forma, pode-se considerar que o período de cobertura da maré, para o objetivo proposto, foi satisfatório. Uma vez que os períodos restantes corresponderiam a momentos com taxas de transporte ínfimas, ou nulas.

Uma vez que no local de fundeio do *Triton* (P3), a atuação das ondas tornou-se preponderante para que fossem geradas taxas de transporte pelo modelo Sedtrans05, é de se esperar que os demais locais de fundeio também demonstrem variações nos valores obtidos, quando forem acrescentados os parâmetros relativos às ondas locais. Desta forma, o padrão encontrado neste estudo pode ter subestimado as taxas de transporte de sedimentos reais dos locais de fundeio dos ADPs. Um fator que pode ter contribuído para os diferentes resultados, é a teoria por trás da própria equação de taxa de transporte total de Bagnold, que apresentou a melhor correlação com os dados *in situ*. Em sua teoria, Bagnold (1963) relata que, como agente mobilizador do sedimento, parte da energia da onda em superfície é transmitida ao fundo, levando a resuspensão e manutenção do grão acima do leito marinho, a partir daí, o transporte ocorrerá através da ação da corrente unidirecional atuante acima do fundo do mar.

Com relação à granulometria adotada nos locais de modelagem, esta pode ter sido um fator importante nos resultados obtidos, especialmente no caso dos fundeios dos

ADPs. Neste caso, não foi possível coletar as amostras de sedimentos de maneira correta, ou seja, devido à presença de formas de fundo, a granulometria e o grau de seleção dos grãos podem variar bastante ao longo destas, como será visto no próximo item. Desta forma, deveriam ter sido feitas coletas de amostras nas feições de crista e de cava de pelo menos uma forma de fundo naqueles locais de fundeio, para que se inserisse no modelo um valor representativo da forma de fundo. No caso do ADV *Triton*, foi possível inserir no modelo valores de granulometria relativos a cada hora do fundeio, em que foram coletadas amostras com a armadilha de sedimentos. Desta forma, a modelagem neste local de fundeio apresentou resultados de situações mais realísticas, onde a granulometria do fundo varia com a velocidade do escoamento. Condição que não foi possível obter nos fundeios dos ADPs.

Como foi destacado anteriormente, e será visto nos resultados das análises das amostras coletadas, em geral, os sedimentos locais apresentam considerável proporção de material carbonático. Mas quando as previsões do modelo consideraram a massa específica da Calcita na modelagem, observou-se que a subestimação do modelo em relação às medições *in situ* aumentou. Segundo Maiklen (1968), são vários os fatores que podem controlar as propriedades hidráulicas dos sedimentos carbonáticos, e influenciar no transporte dos mesmos, como a forma, a angularidade, o tamanho, o retrabalhamento, a distribuição de organismos fontes, dentre outros.

De uma maneira geral, quanto maior o número de taxas de transporte medidas *in situ*, melhor será a calibração do modelo. Isto foi avaliado neste estudo, uma vez que as calibrações utilizando somente os valores relativos à sizígia ou à quadratura apresentaram menores correlações do que as calibrações finais apresentadas anteriormente, onde os dois dias foram usados simultaneamente.

Conforme relatam Neumeier *et al.* (2008), o Sedtrans05 não é aconselhável para zonas de arrebenção de ondas. Por outro lado, o modelo adota a Teoria Linear de Ondas, à qual não prevê transporte líquido de sedimentos no caso de ação exclusiva de ondas, devido à simetria das mesmas, nestas condições. Entretanto, a partir desta análise teórica, o modelo apresenta irregularidades na estrutura de cálculos, uma vez que a própria teoria citada apresenta aproximações com erros associados.

Contudo, o modelo de transporte de sedimentos Sedtrans05 foi uma ferramenta vantajosa na previsão das magnitudes e sentidos resultantes das taxas de transporte. E foi possível observar sua sensibilidade em termos de diferentes condições hidrodinâmicas, como no caso da ausência de ondas. O fato de apresentar cinco equações distintas de taxas de transporte de sedimentos fornece a vantagem de se adaptar o modelo a cada ambiente de estudo, por meio dos resultados de calibração do mesmo, com as taxas obtidas *in situ*. E a partir daí, poder ampliar a área de estudos para pontos relacionados, relativamente próximos.

5.2 TAXAS DE MIGRAÇÃO E GEOMETRIA DAS FORMAS DE FUNDO

5.2.1 Estimativa das taxas de migração de formas de fundo sobre o banco arenoso

Este tópico tem por objetivo verificar a variação das taxas de migração das formas de fundo nos momentos de quadratura e de sizígia das correntes de maré na desembocadura do SEPAPM.

A Tabela 10 mostra os resultados dos experimentos para a estimativa das taxas de migração de um total de oito formas de fundo, nos dias relativos à quadratura e à sizígia. Há de se ressaltar, que devido às restrições logísticas relativas aos campos, não foi possível realizar os experimentos durante um mesmo intervalo de tempo. De forma que eles ocorreram dentro de um período de 10,75 e 9,5 horas, na quadratura e na sizígia, respectivamente. Infelizmente, não foi possível fazer o experimento com as mesmas formas de fundo, mas em função do objetivo proposto, este fator não parece ser primordial, uma vez que se trata de uma investigação focada na escala temporal.

Analisando a Tabela 10 percebe-se que o aumento na intensidade das correntes de maré, associado à transição da quadratura para a sizígia, levou a um aumento nas taxas de migração das formas de fundo. No canal dos experimentos, a profundidade diminuiu no sentido da maré vazante, ou seja, das primeiras até as últimas formas de fundo (1 a 4). Desta forma verifica-se que em geral as maiores taxas ocorrem em

maiores profundidades. A Tabela 11 revela a altura (cm) e o comprimento de onda (m) de seis formas de fundo estudadas nestes experimentos de migração.

Tabela 10: Migração (cm) e taxas de migração (cm/h) das formas de fundo, relativos aos experimentos de quadratura e sizígia.

	QUADRATURA				SIZÍGIA			
Forma de Fundo	1Q	2Q	3Q	4Q	1S	2S	3S	4S
Migração (cm)	22,0	18,0	10,0	10,0	26,0	25,0	28,0	24,0
Taxa de Migração (cm/h)	2,05	1,67	0,93	0,93	2,74	2,63	2,95	2,53

Tabela 11: Comprimentos de onda (m) e alturas (cm) das formas de fundo utilizadas nos experimentos de estimativa das taxas de migração das formas de fundo, os primeiros correspondendo às distâncias relativas entre os vergalhões utilizados.

	QUADRATURA			SIZÍGIA		
Vergalhões	1 e 2	2 e 3	3 e 4	1 e 2	2 e 3	3 e 4
Forma de fundo considerada	1Q	2Q	3Q	1S	2S	3S
Comprimento de onda (m)	2,37	2,33	2,07	3,50	3,43	1,51
Altura (cm)	13,62	13,43	12,20	18,67	18,37	9,45

De acordo com a classificação de Ashley (1990), estas formas de fundo estão inseridas no grupo das dunas pequenas, e em ambos os campos, apresentaram um formato bidimensional (2D), com a orientação da maré vazante. Conforme a Figura 16, também foi observada a presença de formas de fundo menores superpostas às dunas pequenas, nos dois campos, com a mesma orientação. Comparando-se as Tabelas 12 e 11, percebe-se que durante a quadratura o aumento do comprimento das dunas é acompanhado pelo aumento das taxas de migração. O mesmo padrão ocorre com as duas primeiras dunas da sizígia, uma vez que a terceira duna apresentou uma tendência inversa. Estas correlações positivas entre a taxa de migração, as velocidades das correntes de maré e as dimensões das formas de fundo também foram observadas por Boothroyd e Hubbard (1975).

A seguir, as formas de fundo relativas a este experimento serão descritas em termos de granulometria e porcentagem de Carbonato de Cálcio de suas amostras. Na Tabela 12 são mostrados os resultados das análises estatísticas e de teor de CaCO_3

das amostras de sedimentos coletadas nestas formas de fundo. Com base na classificação de Wentworth (1922), a grande maioria das amostras de sedimentos coletada nos experimentos de migração equivale às areias grossas, ou seja, possuem um predomínio de grãos com diâmetros entre 1 e 0,50 mm. As únicas exceções são as amostras coletadas na cava e na crista da quarta duna, e aquela obtida na crista da segunda duna, ambas durante a sizígia. As quais são compostas predominantemente de areias médias (0,50 – 0,25 mm). O padrão inverso de aumento nas taxas de migração com a diminuição das dimensões da duna, observado anteriormente, pode estar associado a esta significativa diminuição da granulometria.

Em ambos os campos de sizígia e de quadratura, foi observada uma granulometria superior das amostras coletadas nas regiões de cava das formas de fundo, quando comparadas às regiões de crista das mesmas. A partir do método considerado, a amostra apresentará um predomínio de sedimentos grossos quando a assimetria possuir uma orientação para os finos, ou seja, quanto mais negativa a assimetria da amostra, maior sua granulometria. Desta forma, a distribuição de assimetrias da Tabela 12 revela que todas as amostras possuem fortes assimetrias para os sedimentos finos. Exceto a amostra da cava da segunda duna, durante a quadratura, a qual é fortemente assimétrica para os finos. Com essa análise também se observa que as amostras coletadas nas cristas das formas de fundo possuem um maior predomínio de sedimentos finos, do que aquelas que foram coletadas nas feições de cava das dunas.

Esta diferença é geralmente associada ao comportamento do escoamento sobre a forma de fundo. Sobre a feição da crista, o fluido se desloca de maneira aproximadamente linear, o que tende a favorecer o grau de seleção dos sedimentos de acordo com a granulometria. Assim que o escoamento passa pela crista, a diferença de altura para a cava tende a romper este padrão de escoamento, gerando assim um comportamento turbulento. Desta forma, os sedimentos da cava são menos selecionados, uma vez que estes apresentam constante movimento de resuspensão e, associado à avalanche que ocorre a partir da crista, sua deposição ocorre de maneira desordenada (Reineck e Singh, 1980) (Figura 28).

Tabela 12: Parâmetros estatísticos (em μm ; média em mm) segundo o método de Folk e Ward (1957), modificado pelo software *GRADSTAT*, relacionados ao peneiramento das amostras de sedimentos das formas de fundo do experimento de migração. Porcentagens de CaCO_3 , e abreviação da classificação dos sedimentos marinhos, segundo Larssonneur (1977, modificado por Dias, 1996). CRI – crista. CAV – cava.

Duna	Feição	Média	Grau de seleção	Assimetria	CaCO_3 (%)	Abreviação
1Q	CRI	0,572	2,19	- 0,12	77,00	AB2c
	CAV	0,769	2,30	- 0,14	70,10	AB2c
2Q	CRI	0,559	1,85	- 0,06	80,98	AB2c
	CAV	0,639	2,65	- 0,31	69,07	AB1c
1S	CRI	0,502	1,91	- 0,15	71,53	AB2c
	CAV	0,510	2,43	- 0,18	62,80	AB1c
2S	CRI	0,442	1,77	- 0,08	68,36	AB1d
	CAV	0,538	2,00	- 0,18	69,46	AB1c
3S	CRI	0,514	1,76	- 0,13	74,17	AB2c
	CAV	0,528	1,88	- 0,22	70,00	AB2c
4S	CRI	0,473	1,77	- 0,12	69,21	AB1d
	CAV	0,474	1,94	- 0,12	59,21	AB1d

Este padrão de escoamento também é corroborado pelo grau de seleção das amostras na Tabela 12. A qualidade do grau de seleção das amostras é inversamente proporcional aos valores. Sendo assim, observa-se que todas as formas de fundo apresentaram um grau de seleção dos sedimentos maior nas regiões de crista, do que nas regiões de cava das formas de fundo.

Com relação ao CaCO_3 , foi verificada uma tendência geral de maior porcentagem deste composto na feição de crista das formas de fundo, com exceção da segunda forma de fundo da sizígia (2S) (Tabela 12). Em geral, os sedimentos carbonáticos apresentam menor mobilidade, quando comparados aos sedimentos siliciclásticos, em função da grande variedade de formas e tipos, como foi visto anteriormente. Desta forma, seu transporte seletivo leva a um predomínio na feição de crista, onde a ausência do escoamento turbulento (ou com maior intensidade) contribui para a sua manutenção no fundo.

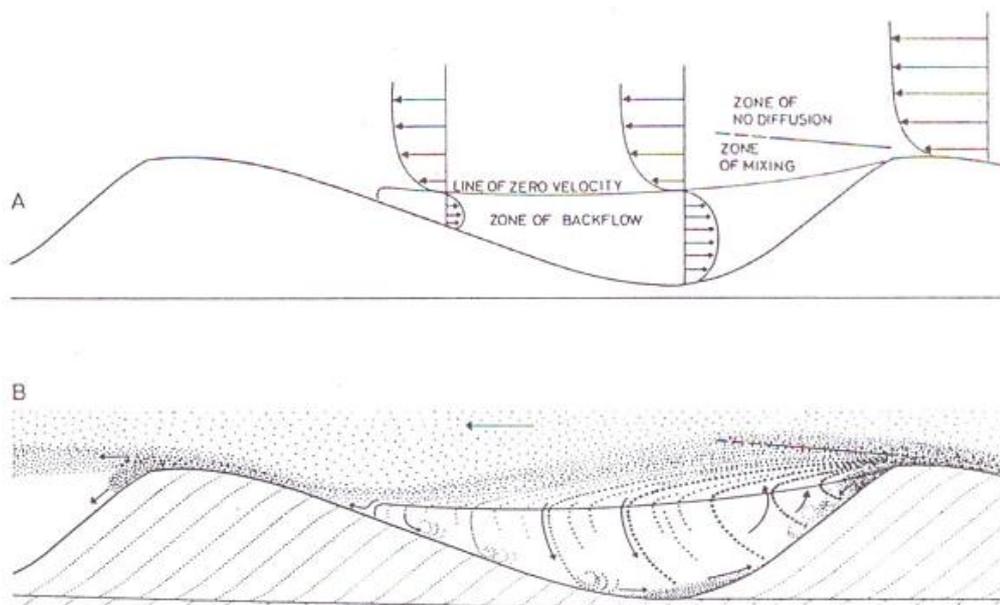


Figura 28: (A) Padrão de escoamento sobre uma ripple. Distribuição de velocidade, separação do escoamento, e as três principais zonas: sem difusão, de mistura, e de escoamento contrário. (B) Padrão de escoamento e processos de sedimentação sobre uma ripple. Os grãos se acumulam e formam uma protuberância na crista, a partir da qual ocorrem avalanches de sedimentos para a cava (Modificado de Reineck e Singh, 1980).

De acordo com a classificação de Larsonneur (1977, modificada por Dias, 1996), as amostras de sedimentos do experimento de migração são constituídas de areias bioclásticas e biolitoclásticas, com o predomínio das frações muito grossas (AB2c e AB1c, respectivamente). Também foram observadas areias biolitoclásticas médias (Tabela 12).

5.2.2 Geometria das Formas de Fundo da Desembocadura do SEPAPM.

Este tópico apresentará o padrão de distribuição espacial das formas de fundo encontradas nos locais de fundeio dos equipamentos utilizados para obter os dados hidrodinâmicos neste estudo.

Os resultados das análises granulométricas e de determinação do teor de Carbonato de Cálcio das amostras coletadas nos locais de fundeio dos ADPs são mostrados na Tabela 14. Assim como a abreviação da mesma classificação dos sedimentos marinhos realizada com as amostras de sedimentos dos experimentos de migração. Enquanto os resultados relativos ao fundeio do ADV *Triton* são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Parâmetros estatísticos (em μm ; média em mm) segundo o método de Folk e Ward (1957), modificado pelo software *GRADSTAT*, relacionados ao peneiramento das amostras de sedimentos no local de fundeio do ADV *Triton*, para os momentos de sizígia e de quadratura. Porcentagens de CaCO_3 , e abreviação da classificação dos sedimentos marinhos segundo Larssonneur (1977, modificado por Dias, 1996). CRI – crista. CAV – cava.

Dia	Local	Média	Grau de seleção	Assimetria	CaCO_3	Abreviação
Quadratura	CRI	0,206	1,73	+ 0,22	64,24	AB1e
	CAV	0,216	1,78	+ 0,16	60,64	AB1e
Sizígia	CRI	0,178	1,54	+ 0,03	41,74	AL2e
	CAV	0,191	1,59	+ 0,06	44,44	AL2e

A distribuição da porcentagem de Carbonato de Cálcio nas amostras coletadas próximas ao *Triton*, nos momentos de sizígia e de quadratura, segue o mesmo padrão observado no local dos experimentos de migração. Ou seja, os menores valores são observados em condições hidrodinâmicas mais intensas (Tabela 13). Observa-se também que estas porcentagens de CaCO_3 influenciaram significativamente o comportamento hidrodinâmico das amostras de sedimentos. Uma vez que numa condição de sizígia, foram observadas granulometrias inferiores às registradas para o momento de maré de quadratura, onde se espera uma maior deposição dos finos, em função da redução nas magnitudes das correntes. Dentro da escala de Wentworth (1922), todas as amostras são compostas por areias finas (0,25 – 0,125 mm).

Já o grau de seleção das amostras ocorreu conforme o padrão esperado sobre as formas de fundo. Em que as cristas, a exemplo do que ocorreu com as dunas do experimento de migração, possuíam amostras com grau de seleção melhor do que aquelas relativas à feição da cava das formas de fundo. De acordo com a Tabela 13, as amostras da sizígia são caracterizadas como moderadamente bem selecionadas (1,41–1,62 μm), enquanto na quadratura as amostras apresentam um mal selecionamento (2,00–4,00 μm). O que pode estar associado a uma mudança composicional das amostras, ou seja, o predomínio dos sedimentos carbonáticos, relativamente mais grossos que os litoclásticos, proporcionou um comportamento mais desorganizado da assembléia de sedimentos.

Os valores relativos à assimetria das amostras indicam um padrão diferente do observado nos experimentos de migração, ou seja, as amostras apresentaram

assimetrias no sentido dos grossos (Tabela 13). Sendo, portanto, constituídas de sedimentos de menor granulometria. Seguindo o padrão demonstrado pela média das amostras. De acordo com a Tabela 13, no momento da quadratura, as amostras foram assimétricas no sentido dos grossos, enquanto na sizígia as amostras foram consideradas como simétricas. Isto reforça uma possível influência do material carbonático no comportamento hidrodinâmico das amostras.

Segundo Dias (1996, modificado de Larsonneur, 1977), as amostras da quadratura são classificadas como areia biolitooclástica fina a muito fina (AB1e). Enquanto a sizígia apresentou amostras compostas de areia litobioclástica fina a muito fina (AL2e).

As formas de fundo neste local (P3) correspondem, portanto a outra categoria, dentro da classificação de Ashley (1990), ou seja, são denominadas ripples, uma vez que, apresentaram comprimento e altura inferiores 60 e 7,5 cm, respectivamente. O autor relata que o desenvolvimento das formas de fundo pode ser controlado, dentre outros fatores, pela profundidade e, conseqüentemente, pela velocidade do escoamento. O que explica as menores dimensões das formas de fundo observadas neste local, em relação aos demais (P1 e P2).

Como foi dito anteriormente, o campo dos ADPs foi realizado em um momento de maré de sizígia mais intensa, com relação aos demais períodos do ano. Portanto, era de se esperar que as amostras associadas apresentassem os menores teores de Carbonato de Cálcio, quando comparadas aos demais fundeios. Compare a Tabela 14 com as Tabelas 13 e 12. Esta reduzida porcentagem de CaCO_3 esteve novamente correlacionada ao baixo grau de seleção dos sedimentos, além de estar também associada ao predomínio dos sedimentos finos, como se observa pelos valores positivos de assimetria. Segundo a classificação de Wentworth (1922), o local de fundeio do *Aquadopp* apresenta areias grossas, predominantemente, enquanto o local de fundeio do *Argonaut* apresentou um domínio de areias médias. Embora não tenha sido possível coletar as amostras nas feições de cava e crista das formas de fundo, nos respectivos locais de amostragem, percebe-se que o fato de o canal de acesso ao SEPAPM apresentar correntes mais intensas do que aquelas medidas sobre o banco, permitiu um transporte de granulometrias maiores, do que aquelas transportadas no local de fundeio do *Argonaut*. O reflexo deste

padrão foi uma maior deposição de sedimentos finos sobre o banco arenoso se comparada ao local de fundeio do *Aquadopp*.

Tabela 14: Parâmetros estatísticos (em μm ; média em mm) segundo o método de Folk e Ward (1957), modificado pelo software *GRADSTAT*, relacionados ao peneiramento das amostras de sedimentos nos locais de fundeio dos ADPs *Aquadopp* e *Argonaut*. Porcentagens de CaCO_3 , e abreviação da classificação dos sedimentos marinhos segundo Larsonneur (1977, modificado por Dias, 1996).

ADP	Média	Grau de seleção	Assimetria	CaCO_3	Abreviação
<i>Aquadopp</i>	0,525	1,72	+ 0,12	31,36	AL2c
<i>Argonaut</i>	0,341	1,64	+ 0,12	36,57	AL2d

Quanto ao grau de seleção, embora ambas as amostras sejam caracterizadas como moderadamente selecionadas, o local de fundeio do *Argonaut* apresentou um grau de seleção melhor. O comportamento turbulento de escoamentos mais intensos, como no caso do *Aquadopp*, pode ter atrapalhado o desenvolvimento da ação seletiva das correntes de maré, como se observa na escala de análise de uma forma de fundo específica (Figura 28).

Outra característica interessante relacionada à assimetria no local de fundeio do *Argonaut*, é que embora a média da amostra seja próxima à de certas amostras do local onde foram realizados os experimentos de migração (Tabela 12), esta amostra apresentou assimetria para os grossos. Indicando um predomínio de sedimentos finos, um padrão inverso aquele das amostras assimétricas nos sentidos dos finos (predomínio de sedimentos grossos), observadas nos campos de 21 e 26 de julho de 2010.

Pela Classificação de Dias (1996, modificado de Larsonneur, 1977), ambas as amostras dos locais de fundeio de *Aquadopp* e *Argonaut* são compostas por areia litobioclástica, em que foram observadas granulometrias grossa a muito grossa (AL2c) e média (AL2d), respectivamente.

Com relação às dimensões das formas de fundo associadas ao *Argonaut*, foi verificada uma repetição do padrão observado nos locais dos experimentos de migração, ou seja, a presença de dunas pequenas com um formato bidimensional (2D), orientadas no sentido da maré vazante (Nordeste). Também foi observada a presença de formas de fundo menores superpostas às dunas pequenas, com a

mesma orientação. O fator diferencial é que as dunas simples apresentaram comprimento e altura médios equivalentes a 2,45 m. e 11,25 cm, respectivamente.

A Figura 29 corresponde a um mosaico sonográfico da desembocadura do SEPAPM. A análise do padrão de Intensidade de Retorno do Sinal (IRS) se restringiu a área do leito marinho em detalhe.



Figura 29: Mosaico sonográfico da desembocadura do SEPAPM. Detalhe: formas de fundo próximas ao local de fundeio do *Aquadopp* (P1). Cores claras remetem à baixa Intensidade de Retorno do Sinal (IRS).

As faixas mais claras correspondem à zona de sombra do sonar, ou seja, por estarem logo abaixo do equipamento, não são imageadas. O interior destas regiões apresenta padrões escuros, possivelmente associados à perda do sinal acústico pelo sonar. Afastando-se destas faixas, são observados tons alternantes de claro e escuro, interpretados como as regiões de crista e de cava das formas de fundo, respectivamente. Nesta imagem, estas feições apresentaram comprimento e altura médios equivalentes a 3,77 m e 19,85 cm, respectivamente, correspondendo assim a dunas pequenas (Ashley, 1990). Elas apresentaram orientação no sentido da maré

vazante (Leste). A resolução da imagem não permitiu identificar formas de fundo superpostas, embora seja possível verificar a sinuosidade das cristas das formas de fundo, tratando-se de dunas do tipo 3D.

É importante ressaltar que o levantamento sonográfico foi realizado cerca de três meses antes do fundeio do ADP *Aquadop*, quando foram obtidos os dados hidrodinâmicos e sedimentológicos. Desta forma, acredita-se que as dimensões utilizadas podem ser inferiores àquelas que realmente ocorriam no dia de fundeio. O que enfatizaria a presença das maiores formas de fundo observadas no estudo neste local.

5.3 ANÁLISE INTEGRADA

O fato de estar localizado em um canal relativamente estreito e profundo (em relação à área de estudo) contribuiu para que o local de fundeio do *Aquadop* (Ponto P1, Figura 11), apresentasse as maiores taxas de transporte, tanto instantânea, como a resultante, dentre os fundeios realizados. Foi observada uma taxa de transporte resultante com uma magnitude de 0,1705 Kg/s/m, orientada no sentido da maré vazante (114,24° - Rosa dos Ventos), ou seja, com uma ordem de magnitude superior à dos demais fundeios. Este sentido e magnitude resultantes estão diretamente associados ao nítido domínio das correntes de maré com as mesmas orientações. Conseqüentemente, este local apresentou as formas de fundo com as maiores dimensões dentro da área de estudo proposta.

Sobre o banco arenoso, verificam-se padrões de escoamento aproximadamente equivalentes em ambos os sentidos das correntes de maré, com ligeiros domínios das correntes de maré enchente. Entretanto, verificam-se vetores resultantes de taxas de transporte de sedimentos no sentido da maré vazante. E as formas de fundo próximas aos locais de fundeio do *Argonaut* (P2) e do *Triton* (P3) também apresentaram uma orientação oposta àquela verificada para o escoamento resultante. Uma observação interessante, que pode estar associada a este padrão, é que todos os fundeios mostraram correntes de maré vazante com menor duração do que aquelas no sentido oposto. Portanto, como a decomposição dos vetores utilizou valores médios, a assimetria temporal das correntes mostrou-se definitiva na determinação dos vetores resultantes de taxas de transporte. O que pode explicar

uma superioridade da taxa resultante de transporte de sedimentos no local de fundeio do ADV (P3) (mais raso, com correntes mais fracas, e formas de fundo menores), em relação àquela observada no local de fundeio do *Argonaut* (P2) (mais profundo, em condições de sizígia mais intensas e, com formas de fundo maiores). Uma vez que no caso do *Triton*, poucas taxas de transporte foram calculadas se comparadas ao fundeio do ADP, em função das limitações logísticas explicadas anteriormente.

Os resultados das análises de porcentagem de Carbonato de Cálcio das amostras indicam que a assembléia de sedimentos da desembocadura do SEPAPM pode ser fortemente influenciada, composicionalmente, pela variação na intensidade das correntes de maré ao longo do ano. De forma que a amostra coletada no ponto P2, no campo realizado durante a maré de sizígia de 02 de março de 2010 apresentou um predomínio dos sedimentos litoclásticos. Enquanto as amostras relacionadas à maré de sizígia de 26 de julho de 2010, próximas ao mesmo ponto, de uma maneira geral, apresentaram teores de Carbonato de Cálcio maiores. Também foi possível observar uma considerável influência do teor de CaCO_3 na granulometria destas amostras de sedimentos coletadas, em função da grande variedade textural dos mesmos e de suas características hidrodinâmicas.

Klein (1970) observou que as regiões com domínio de maré enchente correspondem às partes mais estreitas do corpo arenoso. Enquanto as regiões mais amplas sofrem uma maior influência das marés de vazante. Como foi observado sobre o banco arenoso, o estreitamento do escoamento nos pontos P2 e P3, teve reflexo na determinação das componentes do vetor resultante, gerando um domínio de maré enchente. No ponto P1, apesar da limitação ao norte pelo banco arenoso, a largura relativamente maior do canal foi preponderante, contribuindo para o domínio da maré vazante observado. Conseqüentemente, de acordo com este autor, os sedimentos são transportados ao redor do corpo arenoso, alternando entre zonas de assimetria de velocidades, com domínio de maré vazante ou de enchente. Entretanto, este padrão cíclico não foi observado na área de estudo, uma vez que os vetores resultantes de taxas de transporte, e a orientação das formas de fundo, indicaram um sentido único de transporte, ou seja, a orientação da maré vazante. A grande diferença entre o padrão de assimetria de velocidades das correntes de maré

no canal de acesso ao SEPAPM (P1) e aqueles observados sobre o banco arenoso (P2 e P3), pode ter limitado o desenvolvimento de um padrão cíclico de transporte.

Este padrão cíclico também é enfatizado por Dyer e Huntley (1999), que alertam para sua relevância em termos de contenção da dispersão dos sedimentos sobre o banco arenoso. Como os locais de fundeio não abordaram grande parte da área de influência da desembocadura do SEPAPM, inclusive a extensão do banco arenoso, os resultados aqui apresentados não permitem que seja feita uma extrapolação em termos de contenção de sedimentos, e estabilidade do banco arenoso.

6 CONCLUSÕES

- Em termos de orientação resultante, as taxas de transporte de sedimentos na desembocadura do SEPAPM apresentaram o mesmo sentido das correntes de maré vazante. Com relação às magnitudes resultantes, observou-se que a taxa resultante do canal de acesso ao SEPAPM (P1) apresentou uma ordem de magnitude superior àquelas previstas para o banco arenoso (P2 e P3);
- A calibração do modelo, associada a um bom tratamento laboratorial das amostras de sedimentos envolvidas, permitiu uma melhor correlação entre as taxas previstas e aquelas obtidas *in situ*;
- A modelagem mostrou-se sensível aos dados de entrada, de forma que a ausência de alguns parâmetros pode ter subestimado as condições reais;
- No local de fundeio do ADV (P3), o modelo revelou que a ação das ondas apresenta um papel fundamental no transporte de sedimentos.
- Com relação às assimetrias das correntes de maré, a área de estudo apresentou um intenso domínio da maré vazante no ponto P1. Enquanto nos pontos P2 e P3, foi observado um ligeiro domínio da maré enchente. Este padrão corresponde a uma célula de circulação resultante, relativa aos três locais de fundeios;
- As taxas de migração das formas de fundo revelaram uma tendência de maiores migrações associadas às maiores profundidades e, dimensões destas feições sedimentares. Como esperado, também foi observada uma tendência de aumento nas taxas de migração na passagem da quadratura para a sizígia.
- Com relação às formas de fundo, o canal de acesso ao SEPAPM apresentou as dunas subaquáticas com as maiores dimensões, enquanto no ponto P2, estas formas de fundo apresentaram um desenvolvimento menor. No ponto P3 foram observadas ripples, e todas as formas de fundo observadas apresentaram o mesmo sentido de migração das taxas resultantes de transporte de sedimentos.
- Foi possível observar uma variação na faciologia do canal de fundeio do *Argonaut* (P2), entre as marés de sizígia de março e de julho, correspondendo a um aumento no teor de Carbonato de Cálcio e na

granulometria das amostras coletadas. Padrão associado a uma diminuição da intensidade das correntes de maré.

- Devido à complexidade inerente das condições ambientais marinhas, especialmente no contexto costeiro, percebe-se que a modelagem de transporte de sedimentos atual ainda necessita de aprimoramentos para uma melhor simulação dos processos de transporte de sedimentos marinhos. Entretanto, apesar dos erros associados às aproximações do modelo Sedtrans05, sua utilização na determinação quali-quantitativa das taxas de transporte de sedimentos em escalas espaciais e temporais maiores é também aconselhada.
- O mapeamento das formas de fundo e do padrão de transporte de sedimentos é fundamental para o estudo da estabilidade do fundo marinho. Principalmente no que tange à segurança de estruturas submarinas associadas às indústrias de petróleo e gás (oleodutos, gasodutos, etc.).
- Para um melhor entendimento do padrão de transporte de sedimentos na desembocadura do SEPAPM é aconselhável uma investigação em escala espacial maior, e que apresente também uma cobertura da variação sazonal de suas condições ambientais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albino, J. 1999. **Processos de sedimentação atual e morfodinâmica das praias de Bicanga a Povoação, ES**. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de São Paulo, Brasil.
- Albino, J.; Girardi, G.; Nascimento, K.A. 2006. ESPÍRITO SANTO. In: Muehe, D. **EROSÃO E PROGRADAÇÃO DO LITORAL BRASILEIRO**, p. 227–264.
- Allen, J.R.L. 1968. **Current Ripples**: Their Relation to Patterns of Water and Sediment Motion. Amsterdam: North-Holland, 433 p.
- Allen, J.R.L. 1982. **Sedimentary Structures, Their Character and Physical Basis**, Vol. 1: **Developments in Sedimentology 30A**. New York, 593 p.
- Ashley, G.M. 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. **Journal of Sedimentary Petrology**. Vol. 60 (1), p. 160-172.
- Bagnold, R.A. 1963. Mechanics of marine sedimentation. In: Hill, M.N. (Ed.). **The Sea**, vol. 3. New York: Wiley-Interscience, 507–527.
- Balazs, R.J.; Klein, G.deV. 1972. Roundness-mineralogical relations of some intertidal sands. **J. Sed. Petrol.**, 42, 425-433.
- Bandeira Jr., AN.; Petri, S.; Suguio, K. 1975. Projeto rio Doce. Rio de Janeiro. Petrobrás/Cenpes.203 p. (Relatório Final).
- Barroso, G.F. 2004. **Assessing the Potential for Mangrove Oyster Aquaculture in an Estuarine System of the Southeastern Coast of Brazil**: A Geographic Information System Approach. Tese (Doutorado em Geografia) – University of Victoria, Canada.
- Blott, S.J. Pye, K. 2001. **GRADISTAT**: a grain size distribution and statistics Package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf.Process. Landforms*26, 1237–1248.
- Boersma, J.R.; Terwindt, J. H. J. 1981. Neap-spring tide sequences of intertidal shoal deposits in a mesotidal estuary. **Sedimentology**, 28, 151-170.
- Boothroyd, J.C. 1985. Tidal Inlets and Tidal Deltas. In: Davis Jr., R. A. (Ed.). **Coastal Sedimentary Environments**. New York: Springer-Verlag, 2.ed., p. 445-532.

- Boothroyd, J.C.; Hubbard, D.K. 1975. **Bedform Development and Distribution Pattern, Parker and Essex Estuaries, Massachusetts**. Misc. Paper 1-74, Coastal Engineering Research Center, Ft. Belvoir, VA, 39 p.
- Brown, C.B. 1950. Sediment transportation. In: Rouse, H. (Ed.). **Engineering Hydraulics**. New York: Wiley, 769–857.
- Costello, W.R., Southard, J.B. 1981. Flume experiments on lower-flow-regime bed forms in coarse sand. **Jour. Sed. Petrology**, v.51, p. 849-864.
- Dalrymple, R.W.; Knight, R.J.; Lambiase, J.J. 1978. Bedforms and their hydraulic stability relationships in a tidal environment, Bay of Fundy, Canada. **Nature**, 275, 100-104.
- Davies, J.L. 1964. A morphogenic approach to world shorelines. **Z. Geomorph.** 8, 127-142.
- DHN**. 2010. Disponível em: <<http://www.dhn.mar.mil.br/>>. Acesso em: 18 nov. 2010.
- Dias, G.T.M. 1996. **Classificação de sedimentos marinhos**: proposta de representação em cartas sedimentológicas. Anais do XXXIX Congr. Brás. Geol., 3, 423-426.
- Dias, J.A. 2004. **A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos**. Universidade do Algarve. Faro.
- Dyer, K.R. 1997. **Estuaries**: a physical introduction. 2. ed. – Chichester: John Wiley & Sons.
- Dyer, K.R.; Huntley, D.A. 1999. The origin, classification and modelling of sand banks and ridges. **Continental Shelf Research** 19, 1258 – 1330.
- Dyer, K.R.; Soulsby, R.L. 1988. Sand transport on Continental Shelf. **Annual Review of Fluid Mechanics**, 20, p. 295-324.
- EMCAPA 1981. **Representação gráfica da frequência, direção e velocidade do vento em Vitória, Conceição da Barra e Regência, no Estado do Espírito Santo**. Relatório. 23p.
- Engelund, F.; Hansen, E., 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Vorlag, Copenhagen, Denmark, 62p.

- Flemming, B.W., 1988. Zur Klassifikation subaquatischer, stromungstrans versaler Transportkorper. **Boch. geol. u. geotechn. Arb.**, v. 29, p. 44-47.
- Folk, R.; Ward, W. 1957. Brazos river bar. A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 27, p. 3 - 26.
- Gadd, P.E.; Lavelle, J.W.; Swift, D.J.P. 1978. Estimates of Sand Transport in the New York Shelf Using Near-Bottom Current Meter Observations. **Journal of Sedimentary Petrology**, Miami, v. 48, n. 1, p. 239-252.
- Gordon, R.L. 1989. Acoustic measurement of river discharge. **Journal of Hydraulic Engineering**, 115 (7), 925-936.
- Harms, J.C.; Southard, J.B.; Walker, R.G. 1982. Structures and sequences in clastic rocks. **Soc. Econ. Paleont. Mineral. Short Course 9**, 249 p.
- Harris, P.T.; Collins, M.B. 1985. BEDFORM DISTRIBUTIONS AND SEDIMENT TRANSPORT PATHS IN THE BRISTOL CHANNEL AND SEVERN ESTUARY, U.K. **Marine Geology**, 62, 153-166.
- Jopling, A.V., Forbes, D.L., 1979. Flume study of silt transportation and deposition. **Geografiska Annaler** 61A, 67–85.
- Klein, G.deV. 1970. Depositional and dispersal dynamics of intertidal sand bars. **J. Sed. Petrol.**, 40, 1095-1127.
- Klein, G.deV. 1985. Intertidal Flats and Intertidal Sand Bodies. In: Davis Jr., R.A. (Ed.). **Coastal Sedimentary Environments**. New York: Springer-Verlag, 2.ed., p. 187-224.
- Klein, G.deV.; Whaley, M.L. 1972. Hydraulic parameters controlling bedform migration on an intertidal sand body. **Geol. Soc. Amer. Bull.**, 83, 3465-3470.
- Krumbein, W.C. 1934. Size preferency distribution of sediments. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 4.
- Lancaster, N. 1988, Controls of eolian dune size and spacing. **Geology**, v. 16, p. 972-975.
- Langhorne, D.N. 1982. A study of the dynamics of a marine sandwave. **Sedimentology**, 29(4), 571-594.

- Li, M.Z., Amos, C.L. 2001. SEDTRANS96: the upgraded and better calibrated sediment-transport model for continental shelves. **Computers & Geosciences** 27, 619–645.
- Li, M.Z.; Amos, C.L. 1995. SEDTRANS92: a Sediment Transport Model for Continental Shelves. **Computers and Geosciences**, Dartmouth, v. 21, n. 4, p. 533-554.
- Maiklen, W. R. 1968. Some Hydraulic Properties of Bioclastic Carbonate Grains. **Sedimentology**, v. 10, p. 101-109.
- Martin, L.; Suguio, K.; Flexor, J.; Archanjo, J.D. 1996. Coastal Quarternary Formations of the Southern Part of the State of Espírito Santo. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 68, p. 389-404.
- Martin, L.; Suguio, K.; Flexor, J.M. 1993. **As flutuações de nível do mar durante o Quaternário superior e a evolução geológica de “deltas” brasileiros**. Boletim IG-USP. Publ. Especial 15, 186 p.
- Miller, M.C., McCave, I.N., Komar, P.D. 1977. Threshold of sediment motion under unidirectional currents. **Sedimentology** 24, 507–527.
- Miranda, L.B.; Castro, B.M.; Kjerfve, B. 2002. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo, EDUSP.
- Mook, DH; Hoskin, C.M. 1982. Organic determinations by ignition: caution advised. *Est. Coast. Shelf Sci.* 15: 697-699.
- Moura, M.G. 2009. **Determinação de material particulado em suspensão (MPS) através de métodos diretos e indiretos - estudo de caso Baía de Vitória - ES, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Ambiental) - Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- Muehe, D. 1996. Geomorfologia Costeira. *In*: Cunha, D. S. e Guerra, T. J. A. (Orgs.). *Geomorfologia: Técnicas e Aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- Neumeier, U.; Ferrarin, C.; Amos, C.L.; Umgieser, G.; Li, M.Z. 2008. Sedtrans05: An improved sediment-transport model for continental shelves and coastal waters with a new algorithm for cohesive sediments. **Computers & Geosciences**, v 34, 1223-1242.

- Nielsen, P. 1992. **Coastal Bottom Boundary Layer and Sediment Transport**. Singapura: World Scientific Publishing Co., v. 4.
- Nittrouer, C.A.; Wright, L.D. 1994. Transport of Particles Across Continental Shelves. **Reviews of Geophysics**, Nova Iorque, 32, n. 1, 85-113.
- NORTEK. 2008. **User Guide**. Noruega: Nortek AS, Vangkroken 2, N° 1351 RU D.
- OPEN UNIVERSITY. OCEANOGRAPHY COURSE TEAM. 1999. **Waves, tides, and shallow-water processes**. 2nd ed. - Oxford: Butterworth-Heinemann; Milton Keynes: Open Univ., 227p.
- Reineck, H.E.; Singh, I.B. 1980. **Depositional Sedimentary Environments**. Springer-Verlag, 549 p.
- Schlager, W. 2005. **Carbonate sedimentology and sequence stratigraphy**. SEPM, Tulsa, Oklahoma, 200 S.
- Shields, A. 1936. Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. **Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau**, 26: 5–24.
- Shields, F.D.J.; Knight, S.S.; Testa III, S.; Cooper, C.M. 2003. Use of acoustic Doppler current profilers to describe velocity distributions at the reach scale. **Journal of the American Water Resources Association**, n° 39 (6), 1397-1408.
- Silva, A.E.; Menandro, P.S.; Quaresma, V.S.; Bastos, A.C. 2010. DISTRIBUIÇÃO SEDIMENTAR DO SISTEMA ESTUARINO DOS RIOS PIRAQUÊ-AÇU E PIRAQUÊ-MIRIM, ARACRUZ – ES. **III Seminário de Geoquímica Ambiental**. Niterói, R.J.
- SONTEK. 2008. Sound Principles. **Application note**. SonTek/YSI9940 Summers Ridge Road San Diego, CA 92121.
- Soulsby, R. 1997. **Dynamics of marine sands**: A manual for practical applications. London: Thomas Telford, 249 p.
- Soulsby, R.L. 1983. The bottom boundary layer of shelf seas. In: Johns, B. (Ed.), **Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 189–266.
- Sternberg, R.W. 1972. Predicting initial motion and bedload transport of sediment particles in the shallow marine environment. In: Swift, D.J.P., Duane, D.B., Pilkey,

O.H. (Eds.). **Shelf Sediment Transport, Process and Pattern**, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., 61–83.

Suguio, K. 1999. **Geologia do Quaternário e mudanças ambientais (passado + presente = futuro?)**. São Paulo: Paulo's Comunicação e Artes Gráficas.

Suguio, K; Martin, L.; Bittencourt, A.C.S.P.; Dominguez, J.M.L.; Flexor, J.M. 1985. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. **Revista Brasileira de Geociências**. 15, p. 273-286.

van Rijn, L.C. 1993. **Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas**. Amsterdam: AquaPublications.

van Veen, J. (1935). Sandwaves in the North Sea. In: Goldberg, E.D. (Ed.). **North Sea Science**. Mass.: M.I.T. Press, 101-130.

Wentworth, C.K. 1922. An escale of grade and class terms for clastic sediments. **Journal of Geology**, v. 30.

Yalin, M.S. 1964. Geometrical properties of sand waves. Journal of Hydraulics Division, **Proceedings ASCE 90 (HY5)**, 105–119.