Leonardo Augusto Samaritano dos Santos

Modelagem numérica da dinâmica do sistema estuarino
Caravelas – Peruípe, BA

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, área de Oceanografia Química e Geológica.

Orientador:

Prof. Dr. Eduardo Siegle

Universidade de São Paulo

Instituto Oceanográfico

Modelagem numérica da dinâmica do sistema estuarino

Caravelas – Peruípe, BA.

Leonardo Augusto Samaritano dos Santos

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, área de Oceanografia Química e Geológica.

Julgada em ____/____/____

Prof(a). Dr(a).

Conceito

Prof(a). Dr(a).

Conceito

Prof(a). Dr(a).

Conceito

SUMÁRIO

1-	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Revisão Bibliográfica.....	2
1.1.1	Processos estuarinos	2
1.1.2	Sedimentação estuarina	9
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
2-	ÁREA DE ESTUDO	16
3-	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1	- Descrição Geral do Sistema MOHID	22
3.1.1	- Módulo Hidrodinâmico	24
3.1.2	- Módulo das propriedades da água.....	25
3.1.3	- Módulo Interface Sedimento Água	27
3.2	- Dados disponíveis.....	28
3.2.1	- Dados de batimetria.....	29
3.2.2	- Dados hidrográficos	30
3.3	- Modelagem Numérica	31
3.3.1	- Experimentos.....	33
4-	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	35
4.1	Condição de contorno	37
4.2	Rugosidade do fundo	40
4.3	Grade numérica.....	43
5-	RESULTADOS	46
5.1	Padrão geral da circulação costeira e estuarina.....	46
5.2	Propagação da onda de maré no interior do sistema.....	50
5.3	Experimentos numéricos.....	56
5.3.1	- Experimentos 1A e 1B.....	56
5.3.2	- Experimentos 2A e 2B.....	61
5.3.3	- Experimentos 3A e 3B.....	66
5.3.4	- Experimentos 4A e 4B.....	71
6-	DISCUSSÃO.....	76
7-	CONCLUSÕES	79
8-	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Eduino Siegle pela ajuda na elaboração da dissertação, pela disponibilidade e principalmente pela paciência nesses anos de convivência no laboratório.

Aos companheiros de campo em Caravelas e Nova Viçosa: professores Eduardo, Guto, Mário e Rubens, Marçal, Piero, Fernando, Tom, Camila, Franci, Marta, Pablo, Luísa, Julie, Ale, Tião da Balsa, Gordinho, seu Bene e todo pessoal da pousada.

Ao pessoal da biblioteca e da Didi.

Ao pessoal do LDC, pelas conversas, sérias ou não, e ajuda: Catita, Mari, Ana Amélia, Rafa, Luciano, Carlão, Gabi, Dezinha, Paulo Henrique, Giba, Thalita e Cláudia.

Agradecimento especial às mulheres da minha vida: minha mãe, Valquíria, minhas irmãs, Gabriela e Vanessa, minhas sobrinhas, Mirella e Mayara e à Ju, parceira de todas as horas. Obrigado pelo apoio, conversas, ajuda, paciência e compreensão.

Agradeço ao Instituto Oceanográfico da USP, à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de mestrado e ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo financiamento do Projeto Pró-Abrolhos (Instituto do Milênio).

Ô menina vai ver nesse almanaque como é que isso tudo começou

...

Diz quem foi que fez o primeiro teto que o projeto não desmoronou
Quem foi esse pedreiro, esse arquiteto, e o valente primeiro morador
Diz quem foi que inventou o analfabeto e ensinou o alfabeto ao professor
Me responde por favor

...

Quem é que sabe o signo do capeta, o ascendente de Deus Nosso Senhor
Quem não fez a patente da espoleta explodir na gaveta do inventor
Quem tava no volante do planeta que o meu continente capotou
Me responde por favor

...

Me responde por favor
Pra que tudo começou
Quando tudo acaba

Almanaque (Chico Buarque-1981)

RESUMO

O presente trabalho visa caracterizar, através de experimentos numéricos, a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos em suspensão no sistema estuarino de Caravelas e Peruípe sob diferentes condições forçantes. O sistema é formado por canais que estabelecem a conexão entre os rios Caravelas e Peruípe. Dados de nível de água e velocidade de correntes, obtidos em coletas de campo foram utilizados para aplicar e calibrar o modelo numérico MOHID. Diferentes experimentos numéricos, simulando condições de maré de sizígia e de quadratura com diferentes condições de descarga fluvial, foram realizados. A partir destas simulações foram obtidas distribuições espaciais e pontuais da concentração de sedimentos em suspensão e das correntes forçadas pela maré integradas verticalmente. Em condições de sizígia o estuário é caracterizado por correntes mais intensas e assimétricas, com dominância de vazante. As maiores concentrações médias de sedimento em suspensão ocorreram em condições de sizígia e o transporte de sedimentos resultante foi em direção ao oceano, em função do domínio das correntes de maré vazante. Os experimentos numéricos mostram que os canais que conectam os dois estuários têm papel relevante na dinâmica local. Eles possuem influência na dinâmica sedimentar do sistema estuarino. A hidrodinâmica e o balanço sedimentar do sistema são principalmente modulados pela altura da maré, com pouca contribuição do aporte de água doce.

Palavras-chave: dinâmica estuarina, transporte de sedimentos em suspensão, modelagem numérica, MOHID.

ABSTRACT

The aim of this work is to characterize, through numerical modeling experiments, the hydrodynamics and suspended sediment transport dynamics in the Caravelas ? Peruípe estuarine system under different forcing conditions. The system comprises channels that connect the Caravelas and Peruípe rivers. Water level and current velocity data obtained through field campaigns were used to apply and calibrate the MOHID numerical model. Different numerical experiments simulating spring and neap tides with different river discharge conditions have been conducted. Based on these simulations, the hydrodynamics and spatial and temporal distributions of suspended sediment concentrations have been analyzed. During spring tide the estuary is characterized by intense and asymmetric currents (ebb dominated). The highest average suspended sediment concentration occurred during spring tide conditions, with net sediment transport being seaward. The numerical experiments show that the connecting channels play a relevant role in the local suspended sediment dynamics. The hydrodynamic and sediment balance in the system are modulated mainly by the tidal range, with little influence from the freshwater supply

Keywords: estuarine dynamics, suspended sediment transport, numerical modeling, MOHID

Lista de Figuras

Figura 1.1- Variação da velocidade de queda com a concentração (Mehta, 1984)._____13

Figura 2.1 –Área de estudo, sul do estado da Bahia, região costeira das cidades de Caravelas e Nova Viçosa. Coordenadas geográficas, Datum SAD69 convertido para WGS84.(Fonte:<http://siscom.ibama.gov.br/shapes/>). _____16

Figura 3.1 – Estações de coleta de dados hidrográficos das campanhas de 2007 e 2008._____31

Figura 3.2 – Domínio adotado na simulação, com 466x536 pontos de cálculo. As áreas em verde representam os mangues. Na figura as linhas de grade representam duas células._____33

Figura 4.1 - Domínios dos modelos aninhados, o espaçamento de grade obedece a uma relação, de no máximo 1/3, entre o modelo pai e seu aninhado. Grades com espaçamento de 270 m(a), 90 m(b) e 45m(c), as áreas em branco representam os mangues._____38

Figura 4.2 – Série temporal do nível (a), da velocidade longitudinal (b) e do módulo da velocidade (c), para a estação A, tendo como condição de contorno as constantes harmônicas do modelo global FES2004. Linha contínua representa os resultados do modelo e o símbolo "+" os dados medidos_____39

Figura 4.3 – Série temporal do nível (a), da velocidade longitudinal (b) e do módulo da velocidade (c), para a estação A, tendo como condição de contorno a série temporal medida na estação A. Linha contínua representa os resultados do modelo e o símbolo "+" os dados medidos. _____40

Figura 4.4 – Série temporal do nível (a), da velocidade longitudinal (b) e do módulo da velocidade (c), para a estação A, a rugosidade do fundo foi

considerada 0,0010 m. Linha contínua representa os resultados do modelo e o símbolo "+" os dados medidos._____41

Figura 4.5 – Série temporal do nível (a), da velocidade longitudinal (b) e do módulo da velocidade (c), para a estação A, a rugosidade do fundo foi considerada 0,0008m. Linha contínua representa os resultados do modelo e o símbolo "+" os dados medidos._____42

Figura 5.1.a - Correntes médias para um período de 14 dias de simulação. A escala de cor representa o módulo e os vetores, a direção de velocidade, média para o período de 14 a 28/01/2008._____48

Figura 5.1.b e c - Correntes médias para um período de 14 dias de simulação. A escala de cor representa o módulo e os vetores, a direção de velocidade, média para o período de 14 a 28/01/2008._____49

Figuras 5.2 – Posição das longitudinais nos tributários do rio Caravelas (a) e no rio Peruípe (b)._____51

Figura 5.3 – Variação horária da maré em três pontos de controle ao longo das longitudinais dos tributários do rio Caravelas, para um período de sizígia. Os índices indicam as longitudinais: (a) Caravelas-Macaco, (b) Caravelas-Massangano e (c) Caravelas-Jaburuna._____52

Figura 5.4 – Variação horária da maré em três pontos de controle ao longo das longitudinais dos tributários do rio Caravelas, para um período de sizígia. Os índices indicam as longitudinais: (a) Caravelas-Cupido e (b) Caravelas-Poço._____53

Figura 5.5 – Variação horária da maré em três pontos de controle para um período de quadratura na longitudinal do rio Peruípe._____54

Figura 5.6 – Variação horária da maré em três pontos de controle para um período de sizígia na longitudinal do rio Peruípe._____54

Figura 5.7 – Variação da amplitude da maré ao longo dos tributários do rio Caravelas, para um período de quadratura (a) e de.sizígia (b). Os números na figura indicam as longitudinais: (1) Caravelas-Macaco, (2) Caravelas-Massangano e (3) Caravelas-Jaburuna, (4) Caravelas-Cupido, (5) Caravelas-Poço. _____55

Figura 5.8 – Variação da amplitude da maré ao longo do rio Peruípe, para um período de quadratura e de sizígia. _____55

Figura 5.9 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Macaco) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____57

Figura 5.10 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Massangano) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____57

Figura 5.11 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Jaburuna) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____58

Figura 5.12 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Cupido) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____58

Figura 5.13 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Poço) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____59

Figura 5.14 – Distribuição longitudinal (Peruípe) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____ 59

Figura 5.15 – Campo residual do sedimento em suspensão (mg/L) para um período de maré de quadratura e descarga fluvial de 50 m³/s para o rio Peruípe. _____ 60

Figura 5.16 – Campo residual do sedimento de fundo (kg/m²) para um período de maré de quadratura e descarga fluvial de 50 m³/s para o rio Peruípe. _____ 60

Figura 5.17 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Macaco) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____ 61

Figura 5.18 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Massangano) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____ 62

Figura 5.19 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Jaburuna) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____ 62

Figura 5.20 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Cupido) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____ 63

Figura 5.21 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Poço) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____63

Figura 5.22 – Distribuição longitudinal (Peruípe) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____64

Figura 5.23 – Campo residual do sedimento em suspensão (mg/L) para um período de maré de sizígia e descarga fluvial de 50 m³/s para o rio Peruípe. _____65

Figura 5.24 – Campo residual do sedimento de fundo (kg/m²) para um período de maré de sizígia e descarga fluvial de 50 m³/s para o rio Peruípe. _____65

Figura 5.25– Distribuição longitudinal (Caravelas-Macaco) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 15 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____66

Figura 5.26 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Massangano) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 15 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____67

Figura 5.27 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Jaburuna) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 15 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____67

Figura 5.28 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Cupido) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 15 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____68

Figura 5.29 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Poço) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 15 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____68

Figura 5.30 – Distribuição longitudinal (Peruípe) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 15 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____69

Figura 5.31 – Campo residual do sedimento em suspensão (mg/L) para um período de maré de quadratura e descarga fluvial de 15 m³/s para o rio Peruípe. _____70

Figura 5.32 – Campo residual do sedimento de fundo (kg/m²) para um período de maré de quadratura e descarga fluvial de 15 m³/s para o rio Peruípe. _____70

Figura 5.33 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Macaco) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de 15 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____71

Figura 5.34 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Massangano) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de 15 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____72

Figura 5.35 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Jaburuna) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____72

Figura 5.36 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Cupido) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____73

Figura 5.37– Distribuição longitudinal (Caravelas-Poço) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____73

Figura 5.38– Distribuição longitudinal (Caravelas-Peruípe) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados. _____74

Figura 5.39 – Campo residual do sedimento em suspensão (mg/L) para um período de maré de sizígia e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ para o rio Peruípe. _____75

Figura 5.40 – Campo residual do sedimento de fundo (kg/m^2) para um período de maré de sizígia e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ para o rio Peruípe. _____75

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Principais módulos do sistema Mohid.	23
Tabela 3.1 – Principais módulos do sistema Mohid (continuação).	24
Tabela 4.1 - Qualidade dos resultados do modelo com base na variação do RMAE para as velocidades de acordo com van Rijn et al. (2003).	36
Tabela 4.2 – Parâmetros físicos e numéricos utilizados na calibração do modelo	37
Tabela 4.3 - Tempo (aproximado) gasto em cada simulação e pontos de cálculo	43
Tabela 4.4 – Resultados estatísticos para a calibração do modelo quanto a consideração ou não do aninhamento de grade. Comparação entre os resultados de campo e, as grades aninhadas e a grade de 90 m	44
Tabela 4.4 – Resultados estatísticos para a calibração do modelo quanto a consideração ou não do aninhamento de grade. Comparação entre os resultados de campo e, as grades aninhadas e a grade de 90 m (continuação)	44
Tabela 4.5. - Resultados estatísticos para a calibração do modelo quanto a consideração ou não do aninhamento de grade. Comparação entre os resultados da grade de resolução de 90 m e as grades aninhadas.	45

1- INTRODUÇÃO

A dissertação tem como objetivo o entendimento dos processos que controlam a hidrodinâmica e o padrão de dispersão de sedimentos da região compreendida entre as cidades de Caravelas e Nova Viçosa (17°40'S-18°00'S e 39°30'W-38°30'W), sul do estado da Bahia, na região do banco de Abrolhos. O estudo é parte do projeto "Produtividade, sustentabilidade e utilização do ecossistema do banco de Abrolhos" do Programa Institutos do Milênio (CNPq).

Os sistemas estuarinos são extremamente complexos devido à interação entre os processos químicos, físicos e biológicos. A hidrodinâmica desses sistemas é influenciada tanto pelas marés como pela descarga fluvial e pelo vento. Os processos químicos, bem como os processos biológicos, são influenciados pelas alterações da salinidade, do pH, da concentração de oxigênio dissolvido, pela hidrodinâmica da região e as interações entre espécies. Outro fator condicionante de muitos sistemas estuarinos é a presença de quantidades consideráveis de pequenas partículas argilo-siltosas, em suspensão ou depositadas no fundo.

A sedimentação é um fenômeno natural, consequente das ações erosivas e de transporte exercidas pela ação direta dos agentes naturais (chuva, vento, variações térmicas, escoamentos superficiais, etc.). Os materiais transportados em suspensão ou por arrasto, depositam-se nos locais onde o escoamento é mais lento, particularmente nas planícies e nas zonas marítimas calmas, como os estuários.

Com o desenvolvimento de uma maior consciência ambiental e da necessidade de promover a proteção ambiental, é clara a necessidade de entender os efeitos das atuais estratégias de gestão de estuários e de conseguir prever os efeitos de quaisquer mudanças propostas por essas práticas. Uma das maiores preocupações é a de que a agitação dos sedimentos possa ter como efeito a suspensão das partículas mais finas com

impactos ambientais associados com a ressuspensão e subsequente dispersão do material mais fino. A turbidez resultante pode ser persistente e afetar localmente o crescimento e a reprodução de microrganismos. A grande maioria dos contaminantes químicos potencialmente tóxicos, presentes nos sedimentos do fundo, está associada com a sua fração mais fina, podendo ter um efeito negativo sobre os organismos.

Nesse contexto, o emprego de modelos numéricos adquire relevância para o estudo desses ambientes. Segundo Woodroffe (2002), modelos apresentam uma vantagem nos estudos de ambientes costeiros porque são simplificações das situações do mundo real, em que existe a possibilidade de controlar as variáveis e olhá-las de forma singular no tempo. As simulações não devem ser empregadas para reconstruir o passado ou prever a evolução futura da costa, mas sim como uma ferramenta para experimentação e extrapolação com a qual uma gama de cenários de mudanças pode ser simulada e as variáveis examinadas.

A utilização da modelagem para o estudo de fenômenos em ambientes costeiros representa atualmente um valor agregado na abordagem destas pesquisas, além de contribuir decisivamente para uma melhor compreensão dos sistemas e funciona como ferramenta de apoio à decisão na análise de possíveis alternativas em diversos campos do conhecimento como a oceanografia, a engenharia e a gestão ambiental.

1.1 Revisão Bibliográfica

1.1.1 Processos estuarinos

Os estuários são sistemas de transição entre o continente e o oceano e apresentam alta complexidade. Do ponto de vista biológico são sistemas mais produtivos que o oceano adjacente e que os rios por apresentarem altas concentrações de nutrientes que favorecem a produção primária (Miranda *et al.*, 2002). Segundo Miranda *et al.* (2002), o crescimento das atividades econômicas tem relação direta com esses ambientes uma vez que são locais

propícios para a instalação de portos, constituem uma importante via de acesso para o interior dos continentes e há renovação contínua de suas águas através da ação das marés.

Os processos físicos comuns aos estuários são seus movimentos e a mistura entre as massas de água doce de origem fluvial e salgada do oceano adjacente. Como resultado os estuários são corpos de água não homogêneos e os fenômenos no seu interior variam em amplos intervalos da escala espacial e temporal (Miranda *et al.*, 2002). Processos hidrodinâmicos nas regiões costeiras levam a circulação das águas e, conseqüentemente, ao transporte de sedimentos, sal, nutrientes e demais materiais em suspensão. Diversos fatores como a descarga fluvial, correntes, marés, ventos e ondas levam a diferentes interações e estados de equilíbrio, com a conseqüente alteração dos processos químicos, biológicos e geológicos.

Os estuários são encontrados em todas as regiões litorâneas do globo, sob diferentes climas e regimes de marés (Fairbridge, 1980). Existem diversas definições para os estuários, baseadas em suas características físicas, geológicas, químicas, biológicas e ecológicas. Perillo (1995), lista mais de quarenta diferentes definições, desde as encontradas em dicionários e enciclopédias até as definições físicas, geológicas, químicas, biológicas e ecológicas. Estas definições podem ser baseadas na característica fisiográfica, no gradiente de salinidade, nos padrões de circulação e mistura, na variação da altura de maré, na distribuição de fácies sedimentar e das comunidades biológicas presentes neste ambiente (Dalrymple *et al.*, 1992). Fairbridge (1980) define os estuários como ambientes geologicamente efêmeros, com a gradual sedimentação levando a uma situação de equilíbrio, sendo ambientes geológicos relativamente recentes, com alguns milhares de anos, formados pela variação do nível do mar a partir de oscilações eustáticas (variações do nível do mar), isostáticas (variações do nível da crosta terrestre) ou processos tectônicos. Sua origem está associada a inundação dos vales na zona costeira, devido a subidas do nível relativo do mar. No litoral brasileiro formaram-se ao final da última transgressão marinha, há cerca de 5000 anos (Miranda *et al.*, 2002). Morfologicamente, os estuários podem estar associados ao afogamento do vale de um rio ou a um vale formado por movimentos tectônicos, com ou

sem barras arenosas na embocadura (Fairbridge, 1980). Os estuários de planície costeira são amplamente distribuídos ao redor do mundo, apresentando uma forma irregular, resultado do afogamento de vales de rios durante a transgressão holocênica (Perillo, 1995).

Na definição hidrodinâmica de Cameron e Pritchard (1963) e Pritchard (1967), um estuário é definido como sendo um corpo de água costeiro semifechado com uma conexão livre com o mar aberto, dentro do qual a água do mar é mensuravelmente diluída com a água proveniente da drenagem continental. Dionne (1963) *apud* Fairbridge (1980) definiu um estuário, morfodinamicamente, como um braço de mar que penetra um vale fluvial até o limite de penetração da maré, sendo dividido em três setores: o baixo estuário (ou estuário marinho), com conexão livre com o mar aberto; o médio estuário, com intensas misturas de água doce e salgada e o alto estuário (ou estuário fluvial), sem a presença de água salina, mas sujeito a ação das marés.

Em geral, os padrões de circulação e mistura estuarina estão estreitamente relacionados, tendo influência nos sentidos vertical e longitudinal (Dyer, 1995). Uma classificação baseada nos padrões de variação de salinidade foi introduzida por Pritchard (1952), subdividindo os estuários como:

1. Estuários de cunha salina ou altamente estratificados: a água doce que chega ao sistema, em função de sua menor densidade, tende a se manter na superfície, movendo-se em direção ao oceano. Ao contrário, a água de origem marinha possui maior densidade, penetrando no interior do estuário pelo fundo, apresentando uma diferença acentuada no perfil vertical de salinidade;

2. Estuário parcialmente estratificado ou parcialmente misturado: em condições de baixa descarga e maior amplitude de maré, toda a massa d'água no estuário se desloca à montante e a jusante, enquanto a fricção com o fundo gera atrito e conseqüentemente turbulência, com a maior energia levando a uma maior diluição. As forçantes fluvial e de maré são comparáveis, onde o aumento de salinidade se dá de maneira gradativa tanto na vertical quanto na horizontal. Normalmente, a zona de turbidez máxima é associada a este tipo de estuário;

3. Estuários verticalmente homogêneos ou bem misturados: em condições de baixa descarga fluvial e grande amplitude de maré, os processos de mistura se tornam cada vez mais intensos, até ser capaz de levar a total mistura da coluna d'água. Neste caso, o perfil vertical de salinidade é homogêneo, a salinidade das águas superficiais é igual a de fundo, observando apenas o gradiente longitudinal.

4. Fjords: devido a sua grande profundidade, o efeito da maré passa a ser negligenciável, e os processos de mistura entre a água doce e a água salgada são regidos pelo intrusionamento.

Hansen e Rattray (1966) propuseram uma classificação baseada no diagrama de circulação-estratificação. O parâmetro de estratificação é a proporção entre a diferença de salinidade entre a superfície e o fundo pela salinidade média na coluna d'água. O parâmetro de circulação baseia-se na relação entre a velocidade média na superfície, que é uma medida do poder da circulação vertical, e a velocidade média da vazão fluvial. Nesse diagrama, os estuários podem ser agrupados em quatro classes distintas:

classe 1 – característico em estuários barrados por restingas. Subdivide-se na classe verticalmente misturado (1a) e bem misturado (1b). Em ambos não ocorre circulação gravitacional;

classe 2 - abrange estuários de planícies costeiras e estuários parcialmente misturados. Este tipo é dividido em fracamente estratificado (2a) e parcialmente misturado (2b). Esta classe é caracterizada por uma razoavelmente bem desenvolvida circulação gravitacional e mistura longitudinal;

classe 3 - dominados pelo processo de mistura de moderada a forte estratificação, sendo classificado como pobremente estratificado (3a) e altamente estratificado (3b) caracterizada por circulação gravitacional.

classe 4 - coincidem com o tipo cunha salina, da classificação de Pritchard (1952), ou seja, sistemas fortemente estratificados. A mistura vertical é limitada e a circulação gravitacional é pobre ou inexistente.

De acordo com Miranda *et al.* (2002), a definição mais satisfatória é obtida a partir da adaptação da definição clássica de Pritchard por Dyer: “Estuário é um corpo de água costeiro semifechado com ligação livre com o oceano aberto, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré, sendo que em seu interior a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental”.

Um fator importante na dinâmica estuarina, associado a cada padrão de circulação, está relacionado à direção predominante do fluxo (corrente residual). Neste caso, as correntes residuais podem ser provenientes de dois tipos principais de circulação (Dyer, 1995), sendo eles:

Circulação gravitacional – circulação clássica em um estuário, com movimento resultante da circulação bidirecional em duas camadas, ocasionado pela diferença de densidade, entre a água doce do rio e a água do mar, formando um gradiente vertical e longitudinal de salinidade. O importante no processo é observar as velocidades residuais da corrente, pois estas condicionam a direção preferencial do transporte dos sedimentos. Geralmente, na superfície são em direção ao oceano, enquanto que as velocidades residuais no fundo ocorrem em direção ao continente (Dyer, 1995);

Bombeamento da maré - “tidal pumping” - movimento governado por mares de sizígia, na qual mantém a coluna d’água bem misturada. Caso não ocorra contribuição fluvial, será a assimetria gerada entre os estágios de enchente e vazante da maré que dará o sentido predominante do fluxo (Dyer, 1995). Em caso da descarga fluvial sobrepujar o efeito da maré, não permitindo correntes de enchente, o rio bombeará água para fora do estuário.

Segundo Kjerfve (1990), dentro do ambiente estuarino, as três forçantes mais importantes no processo de circulação são a descarga fluvial, as correntes de maré e a ação dos ventos. Especial atenção será dada às duas primeiras forçantes no âmbito deste trabalho.

A descarga fluvial é uma importante variável para que ocorram os processos físicos, químicos, biológicos e geológicos nos sistemas estuarinos. Neste tipo de sistema, variações na descarga de água doce influenciam os

padrões de circulação e de mistura, a diluição e a intrusão do sal, o transporte de sedimentos, nutrientes, poluentes, e também a distribuição das comunidades biológicas (Perillo, 1995). Do ponto de vista do transporte de sedimentos, o aporte fluvial atua de duas formas principais: (1) aporte de sedimentos pelo rio, e (2) criação de uma estrutura de fluxo através das diferenças de densidade. As diferenças de densidade provocam o aumento das velocidades de correntes de maré enchente no fundo do canal e uma diminuição da mesma próximo à superfície e nas áreas rasas do estuário. O inverso ocorre com as correntes de maré vazante (Dronkers, 1986). À montante da transição água doce - água salgada, o fluxo fluvial está restrito aos canais e a velocidade e turbulência são relativamente altas. Sedimentos finos são transportados em suspensão e sedimentos mais grosseiros são transportados próximos ao fundo. Quando ocorre um alargamento do canal e aumento da área da seção transversal, a velocidade decresce favorecendo a sedimentação de sedimentos mais grosseiros levando à formação de bancos arenosos. Os sedimentos em suspensão decrescem constantemente durante o transporte em direção ao oceano, eles são parcialmente diluídos em razão do aumento do volume de água à medida que a área da seção transversal aumenta. As taxas de acumulação tendem a diminuir em direção ao oceano (Nichols & Biggs, 1985).

Quando a água doce encontra a transição água doce - água salgada, próximo ao fundo, a água fluvial converge com a água estuarina que vai em direção ao continente, e a velocidade tende a zero. O transporte de fundo em direção ao oceano é então reduzido. Os sedimentos em suspensão, por sua vez, são amplamente dispersados pelas flutuações das correntes de maré ou circulação estuarina e ondas (Nichols & Biggs, 1985).

Segundo Nichols e Biggs (1985), durante épocas de alta pluviosidade, a vazão fluvial pode causar condições hidrodinâmicas excepcionais com importantes consequências sedimentológicas. O aporte de sedimentos pelo rio ao longo de poucos dias pode ser maior do que aquele ao longo de vários meses ou anos de vazão normal. As fortes correntes fluviais nestes períodos ressuspendem sedimentos depositados ao longo do canal durante os períodos de menor vazão e os transportam em direção ao oceano. A grande vazão

fluvial pode fazer com que a intrusão salina seja empurrada para fora da desembocadura do estuário, causando um grande transporte de sedimentos diretamente ao oceano (Meade, 1969 *apud* Nichols & Biggs, 1985).

A propagação da onda de maré pode representar o maior mecanismo físico de circulação no ambiente estuarino. A penetração da maré tem um papel fundamental na renovação e mistura das massas d'água, na distribuição de sal, sedimentos e nutrientes dos estuários (Perillo, 1995). Em águas rasas, as marés podem ser amplificadas ou amortecidas a depender da geometria, batimetria e extensão da planície de inundação estuarina. A convergência das margens do estuário faz com que a onda de maré seja comprimida lateralmente e, sob condições de moderado atrito, a conservação de energia ocasiona o aumento significativo da altura de maré. O maior atrito relativo à convergência lateral causa um decréscimo da altura de maré (Perillo, 1995). Se a energia da onda de maré é completamente dissipada por fricção antes de sua reflexão, ou se o canal é muito longo, a onda de maré será uma onda progressiva. A amplitude da maré e a magnitude das correntes de maré diminuem em direção ao limite superior do estuário, existindo uma progressão no tempo dos níveis máximos e mínimos da água e do retorno da corrente ao longo do estuário. Neste caso, a amplitude e a corrente estarão em fase, com as correntes máximas de maré enchente ocorrendo quando o nível d'água é máximo (Dyer, 1997).

Quando o efeito da convergência excede o efeito da fricção e ocorre o aumento na altura de maré em direção ao limite superior do estuário, diminuindo na seção fluvial, a resposta é denominada hipsincrônica. Quando a convergência e a fricção são iguais, a altura de maré é constante ao longo do estuário, sendo denominada de sincrônica. Estuários hipossincrônicos são aqueles nos quais o efeito da fricção domina, fazendo com que a altura da maré diminua ao longo do estuário (Nichols & Biggs, 1985; Dyer, 1995; Dyer, 1997). Associado a amplificação ou amortecimento da onda de maré pode ocorrer a deformação da onda, gerando tempos de enchente e vazante desiguais. Normalmente, em estuários com pouca influencia fluvial, tempos de subida da maré são curtos e associados a correntes de enchente mais fortes

(Lessa *et al.*, 2001), resultando na importação de sedimento para o interior do estuário.

Em um ambiente costeiro raso, no qual a altura da onda de maré é comparável com a profundidade total da lâmina d'água, a propagação de uma onda de maré pode ser tratada como uma onda longa, sem o efeito da fricção. A velocidade da onda decresce como função direta da profundidade da água, fazendo com que a crista da onda se mova mais rapidamente resultando em uma onda distorcida. Nestes casos, uma assimetria considerável da onda de maré e das correntes pode ocorrer. Na maré enchente a água está penetrando uma região de menor profundidade fazendo com que a fricção atue mais sobre a primeira parte da onda de maré enchente em locais de águas mais rasas. Quando a convergência do estuário é rápida, ocorre o aumento do desnível de água e da velocidade de propagação da onda, levando a uma progressão mais rápida da onda de maré enchente do que a de maré vazante, levando a dominância da maré enchente nestes estuários (Dyer, 1995; Dyer, 1997).

Estuários com dominância da maré enchente são geralmente caracterizados por canais rasos, seção transversal retangular e pequenas áreas intermarés (Friedrichs & Aubrey, 1988). A dominância da maré vazante, também pode ser produzida em estuário essencialmente pela interação entre os canais fundos e as áreas de águas rasas, e distribuição da fricção ao longo dos ciclos de maré. Estes estuários se caracterizam por um canal mais fundo, com áreas intermarés mais extensas (Friedrichs & Aubrey, 1988). Dyer (1997) conclui que estuários com dominância da maré enchente tendem a ser de macromarés e hipersincrônicos e estuários dominados pela maré vazante tendem a ser de micromarés e hipossincrônicos. Estuários sincrônicos tendem a não apresentar domínio de vazante ou de enchente.

1.1.2 Sedimentação estuarina

Do ponto de vista geológico, os estuários funcionam como armadilhas de sedimentos fluviais e marinhos. A função natural deste ambiente é atuar como

verdadeiro filtro, retendo o sedimento grosso e expulsando parcialmente os sedimentos finos. Além da descarga fluvial, os dois outros agentes de controle dos processos sedimentológicos são as correntes de maré e a ação das ondas (Perillo, 1995). Estas últimas atuam apenas na proximidade da desembocadura, transportando os sedimentos da antepraia para frente dos estuários, onde estes são, então, mobilizados pelas correntes de maré (Wolanski *et al.*, 1996).

Os estuários e suas desembocaduras são a rota de transporte dos sedimentos do continente em direção ao oceano. Ao longo deste processo de transporte ocorre um processo contínuo de deposição, erosão e transporte, sendo esses processos dependentes da dinâmica do fluxo e das propriedades das partículas (tamanho, forma, densidade e composição). Sedimentos coesivos, devido às suas características físico-químicas e interação entre as partículas, se comportam de forma bastante diferenciada de sedimentos não coesivos (Nichols & Biggs, 1985).

A composição mineralógica dos sedimentos estuarinos é constituída por frações de sedimentos siliciclástico (origem fluvial), carbonático (origem marinha) e materiais orgânicos (McAnally & Mehta, 2001). A combinação entre o diâmetro da partícula e densidade de cada mineral é responsável pela maior ou menor mobilidade durante o transporte em suspensão (Dyer & Manning, 1999).

A circulação de sedimentos em suspensão no estuário possui um comportamento cíclico. O transporte de material sólido na coluna d'água pode ser feito como carga de fundo ou em suspensão, dependendo do tamanho do sólido e das condições de fluxo. As partículas de sedimentos finos ($< 63 \mu\text{m}$) entram no estuário por advecção ou difusão (Mehta, 1984; Nichols, 1984).

Sedimentos finos em suspensão nos estuários são particularmente importantes, pois podem ficar retidos pelos processos estuarinos, suas concentrações podem ser altas e são compostos por diferentes tipos de sedimentos. Suas características podem ser muito variáveis, fato importante na sua deposição, erosão e transporte (Dyer, 1986).

Sedimentos coesivos possuem uma grande área de superfície em relação à sua massa, caracterizados pela abundância de argilo-minerais e normalmente possuem carga negativa em sua superfície (Nichols & Biggs, 1985). A floculação dos sedimentos coesivos ocorre como resultado da carga iônica superficial total das partículas e de sua dupla camada elétrica, sendo propriedades dependentes de fatores como pH e camada orgânica. O potencial de floculação aumenta com o aumento da concentração de sedimentos finos, mas também pode ser ampliado pela diferença na velocidade de sedimentação, inércia dos grãos e tensão de cisalhamento pela velocidade (Dyer, 1986).

Uma propriedade importante no processo de floculação de partículas é a salinidade, pois esta controla a intensidade das cargas de superfície. Portanto, a floculação de partículas fluviais ocorre quando entra em contato com água salgada e a defloculação ocorre quando os sedimentos são levados de volta à água doce (Dyer, 1986).

A deposição é influenciada por vários fatores como: (1) os processos físico-químicos que causam a floculação e agregação das partículas em suspensão na transição da água doce para a água salgada; (2) a circulação estuarina e outros processos hidrológicos tais como a variação da velocidade do escoamento devido ao efeito das marés e alterações da batimetria e (3) a aglomeração provocada por organismos, na forma de pelotas fecais. Existe um número relativamente elevado de organismos que habita o fundo e que se alimentam da matéria particulada em suspensão, aglomerando essa matéria fina em resíduos fecais que são mais densos e possuem uma velocidade de queda superior à das partículas em suspensão originais. Estes resíduos fecais depositados no fundo podem ser quebrados por animais que aí se alimentam, podem ser ressuspensos ou aglutinados ao fundo por invertebrados ou plantas.

A velocidade de sedimentação é um parâmetro importante na determinação do transporte e deposição de sedimentos. Para lamas em flocos, a velocidade de sedimentação é relacionada à concentração (Dyer, 1995). Diferenças consideráveis na relação entre velocidade de sedimentação e

concentração são verificadas quando existem diferenças nos conteúdos de matéria orgânica e estados de turbulência durante a formação de flocos (Dyer, 1986).

A concentração de sedimentos é um importante mecanismo controlador no processo de deposição, isto porque, além do papel que desempenha na floculação, apresenta um efeito inibidor da sedimentação para altas concentrações de material em suspensão. Nestes casos, os flocos encontram-se tão próximos que o fluido que se encontra entre eles é forçado a escoar-se para cima, diminuindo assim a velocidade de queda. A concentração de sedimentos a partir da qual se dá este fenômeno chama-se concentração de sedimentação inibida ("hindered settling") (Dyer, 1986).

A dependência da velocidade de sedimentação em relação à concentração, não atendendo a outros efeitos tais como a salinidade e temperatura, pode ser enquadrada em três intervalos, como está demonstrado na figura 1.1, na qual se apresenta esquematicamente o logaritmo da velocidade de sedimentação contra o logaritmo da concentração. Os três intervalos representam, para baixas concentrações, a sedimentação livre, em que a velocidade é baixa devido à pequena dimensão das partículas que sedimentam. Para concentrações médias, temos a sedimentação floculenta na qual a velocidade aumenta com a concentração, o aumento da frequência de colisões entre partículas aumenta, favorecendo por isso a floculação (Dyer, 1986).

Figura 1.1- Variação da velocidade de queda com a concentração (Mehta, 1984).

Segundo Nichols e Biggs (1985), três fatores controlam a deposição: concentração de sedimentos, velocidade de sedimentação, e tensão de cisalhamento do fluido. O resultado do produto entre a velocidade de sedimentação e a concentração é o fluxo de sedimentação em direção ao fundo. Quando o fluxo é máximo, verifica-se concentrações em torno de 20,0 g/L. Nesta concentração, os flocos ainda estão separados por água, porém, estes colidem uns com os outros, devido ao cisalhamento, levando a um gradual aumento de concentração e de rigidez com a expulsão da água que estava entre os grãos. Como resultado, observa-se que, com a sedimentação, há uma gradual mudança da suspensão dispersa para a formação de uma camada próxima ao fundo com grandes concentrações e, então, para um fundo fluido que se consolidará (Dyer, 1995)

Observa-se, no fundo, um gradiente das propriedades físicas e químicas, devido ao processo de consolidação dos sedimentos depositados. Com o aumento da profundidade, tem-se, também, o aumento exponencial da densidade e da tensão de cisalhamento crítica, ocorrendo, então, erosão. Durante condições de estofa, ocorre, muitas vezes, a formação de uma

camada de lama fluida sobre uma camada mais rígida. A primeira camada, de lama fluida, é facilmente erodida durante um ciclo de maré, sendo suficiente para provocar variações significativas nas concentrações de sedimentos em suspensão no estuário. Segundo Uncles *et al.* (1994) e Schoellhamer (2001), a velocidade da corrente na maré de sizígia é a principal responsável pela ressuspensão do sedimento fino inconsolidado no fundo do estuário. Ao longo do ciclo de maré intensa, o sedimento pode mover-se livremente. Porém, quando o período de quadratura se aproxima, ocorre redução da velocidade de corrente, podendo resultar na consolidação de uma grande concentração de sedimento em suspensão em uma camada próxima ao fundo. Neste caso, a lama pode se tornar parte permanente no fundo, até o próximo ciclo de sizígia (Perillo, 1995). A camada mais rígida é erodida apenas durante condições extremas (Dyer, 1995).

O ciclo de deposição e ressuspensão dos sedimentos nos estuários é influenciado por ciclos de baixa e alta frequência, variando de segundos a anos e regidos pela ação das marés, ondas, vento e regime fluvial (Uncles *et al.*, 1994; Schoellhamer, 2002;). A área de maior concentração de sedimento em suspensão no estuário, em um perfil longitudinal, denomina-se Zona de Turbidez Máxima (ZTM). Ao compararmos a ZTM com as regiões a montante e a jusante, observa-se uma concentração de sedimentos em suspensão cerca de 100 vezes superior. Essa zona pode ser encontrada em estuários de variados tamanhos, formas e submetidos a distintas alturas de marés. Na ZTM, um grande volume de sedimentos em suspensão pode ficar retido dentro do corpo estuarino e passar por várias etapas antes da deposição final (Burchard & Baumert, 1998).

A ZTM fornece uma indicação do potencial de transporte de sedimentos finos no estuário, pois, apesar dos efeitos contrários das correntes do rio, dos fenômenos de diluição e mistura, contém uma elevada percentagem de sedimentos finos móveis. A turbidez máxima é normalmente acompanhada por uma zona de acumulação máxima de sedimentos que é também um local de elevados gradientes de velocidade. Como estes elevados gradientes de velocidade tendem a promover as colisões entre partículas, a elevada deposição de partículas pode ser um resultado da circulação no estuário. O

pico da concentração pode variar até uma ordem de grandeza, sendo valores típicos 100-200 mg/L em estuários de pequena amplitude de maré e 1000 a 10000 mg/L em estuários de grande amplitude de maré (Dyer,1988).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é avaliar, qualitativamente e quantitativamente, a contribuição dos diferentes processos que condicionam a hidrodinâmica e o padrão de distribuição de sedimentos na região dos estuários dos rios Caravelas e Peruípe, sul do estado da Bahia. Para alcançar o objetivo foi aplicado um modelo numérico hidrodinâmico e de transporte de sedimentos.

1.2.2 Objetivos específicos

- calibrar e validar um modelo numérico hidrodinâmico;
- verificar a distorção da onda de maré nos estuários;
- estudar os efeitos da hidrodinâmica no transporte de sedimentos em diferentes ciclos de maré e descarga fluvial;
- verificar a contribuição dos canais que formam o sistema no padrão de dispersão dos sedimentos;

2- ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a região costeira dos municípios de Caravelas e Nova Viçosa, localizados no extremo sul da Bahia, costa leste brasileira. Abrange a planície costeira de Caravelas, que inclui a Ponta da Baleia e a foz dos rios Caravelas e Peruípe (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Área de estudo, sul do estado da Bahia, região costeira das cidades de Caravelas e Nova Viçosa. Coordenadas geográficas, Datum SAD69 convertido para WGS84. (Fonte: <http://siscom.ibama.gov.br/shapes/>).

A formação da planície costeira de Caravelas não está relacionada à presença de um rio de grande vazão, mas sim ao desenvolvimento de recifes de corais que constituem um obstáculo ao transporte de sedimentos da região (Andrade, 2000). Desta forma, a evolução quaternária da planície costeira de Caravelas está fortemente associada às mudanças relativas do nível médio do mar, que proporcionaram o desenvolvimento dos recifes de coral, que por sua vez tiveram papel fundamental no regime de dispersão e acumulação de sedimentos ao longo desta região costeira (Andrade *et al.*, 2003).

Dominguez e Andrade (2002) apresentam as principais características das unidades geológico-geomorfológicas presentes na planície costeira de Caravelas e os processos ativos associados. Essas unidades são os tabuleiros costeiros, os terraços arenosos internos, os terraços arenosos externos, os terraços argilosos, os manguezais/planícies de maré, os brejos e as praias. No âmbito deste trabalho especial atenção é dada às unidades que estão diretamente ligadas aos processos sedimentares atuais.

Os manguezais, por serem considerados ecossistemas de transição entre o ambiente oceânico e terrestre, estão sob forte influência dos processos marinhos e terrestres, inclusive sob efeito das atividades antrópicas desenvolvidas no continente, além dos processos atmosféricos. A área é cortada por inúmeros canais, que servem de conduto para a entrada e saída das marés. É um ambiente totalmente instável por estar sujeito às inundações periódicas pela água do mar. A região de intermarés é inundada duas vezes ao dia, enquanto que a região de supramarés é inundada somente nas marés mais altas de sizígia e, esporadicamente, em marés altas de tempestade. O substrato dos bosques de mangue está sujeito a mudanças periódicas devidas à erosão e sedimentação, geralmente resultante das inundações estuarinas (Masteller, 1989 *apud* Dominguez & Andrade, 2002).

Os depósitos de brejo ocupam principalmente as zonas baixas e os vales dos rios e riachos. No primeiro caso, trata-se de áreas anteriormente ocupadas por lagunas, enquanto que no segundo, estão associados às planícies de inundação dos rios e riachos. Os brejos são áreas sujeitas à inundação. Podem permanecer secos em períodos de estiagem prolongada, mas, em função do clima desta região, geralmente estão alagados com água doce.

Segundo Dominguez e Andrade (2002), as praias da região são constituídas por areia de granulometria que varia de fina a grossa, moderadamente a bem selecionadas. Nas proximidades da Ponta da Baleia, próximo à Barra de Caravelas, e na faixa compreendida entre a Tomba e Barra Nova, na Ilha da Caçumba, afloram na praia antigos depósitos de manguezais (sedimentos argilosos orgânicos).

As desembocaduras fluviais são parcialmente obstruídas por pontais arenosos e apresentam um complexo padrão de mudanças relacionadas à própria dinâmica de funcionamento destas desembocaduras. Nestas áreas, flutuações nas vazões dos rios ou correntes de maré alteram a dinâmica costeira provocando erosão e deposição localizadas, que não estão necessariamente relacionadas às tendências apresentadas pela linha de costa em regiões afastadas da desembocadura. Segundo Andrade (2000), a erosão observada na linha de costa da área de estudo está relacionada, entre outros fatores, à influência da dinâmica de canais de maré e desembocadura de rios, à inversão no sentido do transporte litorâneo e ao crescimento de pontais arenosos. Na ilha Pontal do Sul prevaleceram os processos erosivos responsáveis por uma variação espacial negativa. Segundo o autor, a face da ilha voltada para o oceano sofreu intensa erosão enquanto sua face voltada para o continente manteve uma relativa estabilidade. A Ponta do Catoeiro também apresentou uma forte tendência de crescimento lateral. O pontal também apresentou uma tendência à migração em direção ao oceano, e à erosão na retaguarda. O balanço entre os processos erosivos e de acumulação que atuaram sobre a ponta do Catoeiro geraram um aumento de área.

Azevedo *et al.* (2005) compararam as posições da linha de costa mapeadas em 1987 e 2001, e fizeram uma análise das mudanças morfológicas resultantes da soma dos processos erosivos e deposicionais que ocorreram neste intervalo de tempo. Os autores destacam as regiões com variações morfológicas mais significativas em toda a área de estudo: a foz do Rio Itanhém, a ilha Pontal do Sul e a Ponta do Catoeiro (Figura 2.1). Segundo os autores, os resultados mostram que na área de estudo a linha de costa está sujeita a sensíveis alterações, apresentando erosão em alguns trechos e deposição em outros, particularmente em associação com o crescimento de pontais arenosos. As regiões descritas localizam-se nas desembocaduras dos

principais rios da região, sendo que apenas uma delas (a ilha Pontal do Sul) não apresenta um pontal arenoso associado. Na Ilha Pontal do Sul os processos erosivos prevaleceram sobre os de deposição por razões, que segundo os autores, ainda não são totalmente compreendidas. Já nas demais regiões destacadas, a progradação lateral do continente através do crescimento de pontais arenosos pode ser observada.

A temperatura média máxima na região é de aproximadamente 25,5 °C, entre os meses de janeiro e fevereiro, enquanto que a média mínima é 21,5 °C, nos meses de junho a agosto (SRHSH, 1997). A precipitação média anual encontra-se em torno de 1.400 mm/ano. O trimestre mais chuvoso ocorre entre dezembro e fevereiro, e o período de seca acontece entre agosto e setembro (SRHSH, 1997). A circulação atmosférica da região apresenta um padrão que varia com a migração sazonal da célula anti-ciclônica do Atlântico Sul, ocorrendo o predomínio de ventos de NE na primavera/verão e de E e SE no outono/inverno. Episodicamente, o avanço das massas de ar polar adiciona um componente S-SE ao regime dos ventos (Leão, 1999; Leão & Dominguez, 2000 *apud* Azevedo *et al.*, 2005).

Dutra (2003) obteve dados sobre a intensidade e a direção dos ventos e estes mostraram ventos dominantes de NE, com velocidades variando de 3,60 a 8,24 m/s, ocorrendo de outubro a fevereiro e ventos de E, com intensidade de 2,06 a 5,15 m/s, nos meses de março a setembro. Ainda segundo o mesmo autor, existe um aumento no percentual de ventos de S e SE entre os meses de março a setembro, caracterizando a chegada de frentes frias na região de estudo, com velocidades médias dos ventos variando entre 3,60 e 10,81 m/s.

A planície costeira de Caravelas é constituída por uma série de feixes de cordões arenosos que apresentam inúmeros truncamentos e mudanças de orientação. Essas feições são indicadores geomorfológicos de inversões no sentido da deriva litorânea ocorridas ao longo do Quaternário (Bittencourt *et al.*, 2000), e recentemente modeladas (Andrade *et al.*, 2003). Existem duas sequencias de ondas na área, as quais coincidem com o regime dos ventos. As ondas que ocorrem durante a primavera/verão (outubro a fevereiro) são dirigidas pelos ventos de nordeste/leste, e chegam a alcançar alturas de 1 m e períodos de 5 s (US Navy, 1978 *apud* Leão, 1999). Esta sequencia de ondas provoca um transporte de sedimento por deriva litorânea com sentido para sul

ao norte da Ponta da Baleia (Leão, 1999; Andrade, 2000). Na sequência de outono/inverno (março a setembro) dominam as ondas provenientes dos quadrantes de sudeste e sul-sudoeste, com alturas significativas de 1,5 m e períodos de 6,5 s (US Navy, 1978 *apud* Leão, 1999). Essas ondas produzem um transporte de sedimento por deriva litorânea com sentido para norte, ao sul da ponta da Baleia (Leão, 1999; Andrade, 2000).

Na região as frentes de onda de NE e E começam a interferir com o fundo marinho a uma profundidade aproximada de 20 m, enquanto as de SE e SSE começam a partir dos 35 m (Bittencourt *et al.*, 2000). Em uma escala de 1:300000, Bittencourt *et al.* (2000) mostram que a região de estudo é normalmente caracterizada por baixos níveis de energia de onda, com regiões de sombra de onda e grandes trechos de divergência de raios de onda, que são locais de enorme dispersão de sedimento. Tal fato está associado à grande concentração de recifes que amortecem a energia destas ondas (Dutra, 2003).

Pianca *et al.* (2010) encontraram uma variação de 3,7 (outono), 4,4 (inverno), 3,3 (primavera) e 3,6m (verão) para a altura da onda, sendo que os maiores e menores valores (0,7 m e 5,0 m) ocorreram no inverno. Os períodos variaram de 13,0(outono), 14,6(inverno), 13,7(primavera) e 14,0s(verão), o menor período de onda ocorreu no inverno (3,0s) e o maior na primavera (17,7), no inverno o período máximo foi de 17,6s. A direção predominante é de leste com altura entre 1,0 a 2,0 metros e período de 6 a 8 segundos, no verão, primavera e inverno. No outono a predominância é de ondas de sul, com períodos de 10 a 12 segundos e alturas de 1,0 a 3,0 m.

A plataforma continental na região é denominada de Plataforma Continental Leste Brasileira, possui uma largura média de 50 km chegando a atingir 200 km em frente a Caravelas no Banco de Abrolhos. Segundo Leipe *et al.* (1999) e Summerhayes *et al.* (1976) a circulação sobre a plataforma continental e zona costeira é principalmente influenciada pela massa de água tropical (AT) associada à Corrente do Brasil e suas oscilações que resultam em vórtices e meandros.

Lessa e Cirano (2006) e Teixeira (2006) sugerem que o vento de larga escala e fluxos sub-inerciais são os mecanismos de maior importância para a circulação, com a modulação da maré exercendo um papel secundário. Os

autores classificaram o regime de maré como mesomaré e semi-diurno. A altura máxima é de 2,3 m durante sizígia e a mínima de 0,5 m durante quadratura. As correntes de marés dirigem-se de sul para norte com um intervalo de 1 hora e 45 minutos a partir de Mucuri (30 km ao sul da cidade de Nova Viçosa) para as ilhas de Abrolhos e Cumuruxatiba (30 km ao norte da cidade de Prado) (Leão, 1999). As correntes de maré são regulares, a menos que sejam influenciadas pela força e direção dos ventos, com velocidades médias de 0,51 a 0,77 m/s (Sailing Directions (enroute), 2001 *apud* Dutra, 2003).

Schettini e Miranda (2010), coletaram dados de corrente, salinidade, maré e material particulado em suspensão (MPS) em duas seções transversais próximas da desembocadura do estuário do rio Caravelas durante um ciclo de maré de sizígia, além de dois perfis longitudinais de salinidade e temperatura perfazendo distâncias de 16 km e 26 km estuário acima, durante a baixa-mar e a preamar respectivamente. O estuário foi classificado como bem misturado controlado principalmente por correntes de maré, com dominância das correntes de vazante. O transporte de material particulado em suspensão também apresentou comportamento modulado pela maré e por processos costeiros, com o aporte continental de água doce exercendo papel irrelevante.

3- MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir são apresentadas a descrição dos módulos utilizados e os dados disponíveis que foram utilizados como dados de entrada e nos processos de calibração e validação do modelo.

O modelo necessita, para a sua aplicação, de alguns dados de entrada como: dados relativos à batimetria da região de estudo e as condições de contorno com a superfície e com o fundo.

3.1 - *Descrição Geral do Sistema MOHID*

A presente aplicação da modelação hidrodinâmica e de transporte à zona costeira de Caravelas e Nova Viçosa baseou-se no sistema MOHID. O sistema de modelos MOHID, desenvolvido no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, compreende um conjunto de módulos capazes de simular a hidrodinâmica, fenômenos de dispersão (abordagens lagrangeana e euleriana), qualidade da água e transporte de sedimentos (coesivos e não coesivos). Atualmente, o modelo Mohid consiste em mais de 60 módulos organizados numa estrutura que reúne mais de 300 mil linhas de código (Braunschweig *et al*, 2003 *apud* Campuzano *et al.*, 2009).

A divisão do sistema é feita em módulos, podendo cada módulo ser entendido com um modelo, sendo, no entanto, o sistema composto por um único executável. O tempo de execução do programa (tempo simulado versus tempo da unidade central de processamento) varia em função da grade e do passo de tempo utilizado (Campuzano *et al.*, 2009).

O modelo Mohid permite rodar submodelos integrados a modelos maiores, característica que permite o estudo de áreas locais obtendo as condições de contorno dos modelos com domínio maior e o número de submodelos é limitado somente à capacidade dos computadores. Este modelo resolve as equações para águas rasas, usando um algoritmo semi-implícito, baseado em volumes finitos, e permite a simulação de escoamentos

produzidos por diferentes agentes forçantes como a maré, o vento, as ondas geradas pelo vento ou o campo de densidade.

O sistema Mohid é dividido por módulos sendo cada um responsável por uma tarefa específica. Estes módulos são divididos em 4 grandes tipos: os módulos que estão relacionados com a descrição da malha computacional, os módulos que gerenciam a entrada e saída de dados numéricos, os módulos que são responsáveis pelas condições de contorno do modelo e por último os módulos que modificam as variáveis de estado do modelo. Na Tabela 3.1 são apresentados os principais módulos do modelo e uma breve descrição dos mesmos.

Tabela 3.1 – Principais módulos do sistema Mohid.

Principais módulos relacionados com as variáveis de estado	
Nome	Descrição
<i>Hidrodinâmico</i>	Gera e atualiza a informação do escoamento. Utiliza as condições de contorno aberta, da superfície, do fundo e das descargas para obter as velocidades e níveis. No caso do forçamento baroclínico recebe ainda a densidade da água do módulo Propriedades da Água.
<i>Propriedades da Água</i>	Gera e atualiza a evolução das propriedades da água na coluna d'água. É responsável pela interação das propriedades da água com a superfície (Interface Água Ar) e o fundo (Interface Sedimento Água). Transporta as propriedades da água (Advecção-Difusão) e atualiza as entradas e saídas de descargas de água (Descarga) e recebe os fluxos do módulo Hidrodinâmico.
<i>Lagrangeano</i>	Módulo de transporte lagrangeano, simula as mesmas propriedades do módulo Propriedades da Água.
<i>Turbulência</i>	Modelo de turbulência horizontal e vertical, que permite o cálculo da energia cinética turbulenta, do comprimento de mistura, da viscosidade e da difusividade

Tabela 3.1 – Principais módulos do sistema Mohid (continuação).

Módulos relacionados com as condições de contorno	
Nome	Descrição
<i>Interface Água Ar</i>	Disponibiliza as condições de contorno à superfície
<i>Interface Sedimento Água</i>	Disponibiliza as condições de contorno junto ao fundo
<i>Descarga</i>	Informação de entrada / saída de um volume de água, podem ser incluídas propriedades como temperatura, salinidade, sedimentos coesivos, etc.

Segundo Campuzano *et al.* (2009), o modelo Mohid tem sido aplicado em diferentes ambientes e escalas, desde grandes aplicações costeiras como a frente Atlântico-Europeia, a costa Ibérica ocidental e o Mar do Norte até lagoas costeiras e diferentes estuários da costa portuguesa, e outros estuários europeus.

3.1.1 – Módulo Hidrodinâmico

O módulo hidrodinâmico do modelo resolve as equações do movimento. As aproximações admitidas são a de Boussinesq e a hidrostática (Santos, 1995).

As equações do movimento e continuidade resolvidas pelo módulo hidrodinâmico, em coordenadas cartesianas, são:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v \\
 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial z} \right)
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Onde, t é o tempo; u, v, w são as componentes da velocidade nas direções x, y, z ; f é o parâmetro de Coriolis; p é a pressão; ρ é a densidade da água; g é a aceleração da gravidade, e A_H e A_V são as viscosidades horizontal e vertical.

As velocidades horizontais são calculadas com base nas equações do movimento enquanto a localização da superfície livre e a velocidade vertical são calculadas por continuidade. As equações são aplicadas explicitamente a cada volume de controle em um referencial tridimensional.

As condições de contorno abertas podem ser do tipo fluxo imposto, nível imposto, radiativas ou mistas. Em alguns casos existem contornos fechados, através das quais as trocas de massa são nulas e contornos móveis. Os contornos móveis são contornos fechados cuja posição evolui no tempo. Este tipo de contorno é utilizado para simular zonas entre-marés nos estuários. O modelo verifica em cada passo de tempo quais os pontos inundados.

3.1.2 - Módulo das propriedades da água

O módulo das propriedades de água coordena toda a evolução das propriedades da água na coluna de água. A evolução das propriedades depende dos transportes advectivo e difusivo e das condições de contorno. Este módulo utiliza as informações dos seguintes módulos para coordenar a evolução das propriedades de água:

- módulo Hidrodinâmico para obter os fluxos entre as células;
- módulo Turbulência para obter as viscosidades e difusividades;
- módulo Atmosfera para obter os fluxos entre a atmosfera e a coluna de água;
- módulo Interface Sedimento Água para obter os fluxos entre o fundo e a coluna de água;
- módulo Advecção-Difusão para resolver o transporte das propriedades.

Neste módulo, além da evolução de propriedades como salinidade e temperatura, é calculado o transporte de sedimentos coesivos na coluna d'água. Esse transporte é governado pela equação 3D da advecção-difusão, onde a componente vertical inclui a velocidade de queda da partícula, na sua forma conservativa a equação pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial[(w + W_s)C]}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Onde, C é a concentração do sedimento em suspensão; t é o tempo; x e y são as coordenadas horizontais e z é a coordenada vertical; ϵ_x , ϵ_y e ϵ_z são os coeficientes de difusão de massa; W_s é a velocidade de queda; e u,v,w são as velocidades do fluxo nas direções x, y e z, respectivamente.

Na equação 5 são assumidas propriedades conservativas. A massa total de sedimentos em suspensão só pode mudar devido a fluxos através das fronteiras (fronteiras abertas, superfície livre e fundo). Os fluxos através dos contornos abertos e em toda a superfície livre devem ser impostos. Os fluxos através da interface de fundo são uma função das concentrações calculadas pelo modelo, da hidrodinâmica e das propriedades do sedimento. Numericamente, o transporte horizontal é resolvido de forma explícita, enquanto que o vertical, incluindo a velocidade de queda, é resolvido implicitamente, por razões de estabilidade numérica.

A velocidade de queda é obtida de outro modulo e é calculada por:

$$W_S = K_L C^m, \quad \text{se } C < C_{HS} \quad (6)$$

$$W_S = K_L C_{HS}^{m_L} [1 - K_{L1}(C - C_{HS})], \quad \text{se } C > C_{HS} \quad (7)$$

Onde, C é a concentração de sedimentos; C_{HS} é a concentração a partir da qual a sedimentação começa a ficar inibida; K_L e K_{L1} são duas constantes que dependem do tipo de mineral, e m e m_L são constantes que dependem da dimensão e forma da partícula.

3.1.3 - Módulo Interface Sedimento Água

O módulo da interface entre o sedimento e a água é responsável pelo fornecimento das condições de contorno junto ao fundo e pelo cálculo dos fluxos nessa interface, nomeadamente a erosão e a deposição de sedimentos.

No fundo, a tensão de cisalhamento é imposta assumindo um perfil logarítmico de velocidade:

$$\tau = c_d |\bar{u}_+| \bar{u}_+ \quad (8)$$

$$c_d = k^2 \left(\ln \frac{z_+}{z_0} \right)^{-2} \quad (9)$$

Onde, τ é a tensão de cisalhamento no fundo; u_+ é o vetor velocidade a distância z_+ do fundo; c_d é o coeficiente de atrito no fundo; k é a constante de von Karman e z_0 é a altura da rugosidade física.

As condições de contorno são impostas pela definição de um fluxo no fundo, F_b , correspondente ao balanço entre a erosão, F_{ERO} , e a deposição F_{DEP} , e por um fluxo nulo na superfície livre, F_ξ :

$$N(z_b, t) = F_b = F_{ERO} - F_{DEP} \quad (10)$$

$$N(z_\varepsilon, t) = F_\varepsilon = 0 \quad (11)$$

O algoritmo de cálculo utilizado para determinar o fluxo de deposição de sedimentos é o proposto por Krone (1962), que relaciona a probabilidade de deposição de uma partícula com o fluxo de deposição F_{DEP} , para calcular a massa de sedimentos que se depositam M_D :

$$\begin{cases} \frac{dM_D}{dt} = (Cw_S)_B \left(1 - \frac{\tau}{\tau_D}\right) & se \ \tau < \tau_D \\ \frac{dM_D}{dt} = 0 & se \ \tau > \tau_D \end{cases} \quad (12)$$

Onde, τ é a tensão de cisalhamento junto ao fundo; τ_D é a tensão crítica de deposição, o índice B significa junto à interface coluna de água-sedimento.

Considera-se que a erosão acontece quando a tensão de cisalhamento junto ao fundo é superior a uma tensão crítica de erosão. O algoritmo para calcular o fluxo erosivo F_{ERO} , e a correspondente massa erodida por unidade de área em um determinado período de tempo, M_E , é, segundo Partheniades (1965):

$$\frac{dM_E}{dt} = E \left(\frac{\tau}{\tau_E} - 1 \right) \quad se \ \tau > \tau_E \quad (14)$$

$$\frac{dM_E}{dt} = 0 \quad se \ \tau < \tau_E \quad (15)$$

Onde, τ é a tensão de cisalhamento junto ao fundo; τ_E é a tensão crítica de erosão e E uma constante de erosão, que depende das características físico-químicas dos sedimentos.

3.2 - Dados disponíveis

Os modelos antes de poderem produzir resultados satisfatórios precisam de um conjunto de dados para poder calibrar os seus parâmetros e de outro

conjunto para validar os resultados. O fato de serem representações simplificadas da realidade pode fazer com que o modelo e a realidade evoluam em direções diversas, desta forma, o monitoramento e aquisição de dados se tornam importantes para verificar e corrigir esta situação.

Os dados incluem a batimetria e parâmetros hidrodinâmicos nos estuários. A primeira campanha de campo foi realizada em agosto de 2007 e a segunda campanha em janeiro de 2008 que corresponde à estação chuvosa na região, seguindo a metodologia aplicada no projeto “Produtividade, sustentabilidade e utilização do ecossistema do banco de Abrolhos” dos programas Institutos do Milênio.

A seguir são apresentados os dados disponíveis para a área de estudo e que foram utilizados no âmbito deste trabalho.

3.2.1 - Dados de batimetria

Os dados batimétricos utilizados na confecção da malha do modelo foram obtidos de levantamentos, realizados nas campanhas de 2007 e 2008, por ecossondagem na região interior do estuário, nos principais canais que ligam as cidades de Nova Viçosa e Caravelas. Os levantamentos foram realizados com o uso de Eco-sonda Furuno LS -4100 e GPS Garmim 12XL e tiveram espaçamento da ordem de 500 m. Os dados da região costeira foram obtidos das cartas náuticas da série 1300 da Diretoria de Hidrografia Náutica (DHN) e esse conjunto foi utilizado na confecção da grade computacional.

Adicionalmente aos dados de batimetria foram utilizadas imagens de satélite LANDSAT e do programa Google Earth, para delimitar a área coberta pela vegetação de manguezal, com o objetivo de incluir no modelo as áreas de inundação pelas marés. Com base nessas imagens foram extraídos os contornos referentes à linha de costa da região (Figura 3.1). As imagens LANDSAT foram processadas seguindo a metodologia descrita por Cunha-Lignon (2001) e serviram de base para a digitalização dos contornos das áreas de mangue e da linha de costa. Como o nível de detalhamento das imagens do Google Earth são maiores (maior resolução), essas foram adotadas para a

extração das características mencionadas. Esse procedimento foi realizado com o software ILWIS versão 3.4.

Nas áreas alagáveis foram introduzidos pontos que variavam entre 0 e - 3 m para representar sua topografia, sendo que os valores escolhidos tiveram por base a variação da maré para a região.

Com os contornos da linha de costa e dos dados batimétricos foi implementado o modelo numérico. O sistema Mohid oferece uma ferramenta para interpolação dos dados batimétricos que realiza interpolação por triangulação. Após a realização desse procedimento foi feita uma comparação visual com as cartas náuticas disponíveis de onde se constatou que a discretização do espaço não foi satisfatória. Em virtude desse fato optou-se por realizar uma interpolação do tipo *krigagem* no programa SURFER 8.0 e a mesma análise visual foi realizada, tendo sido os resultados dessa interpolação considerados bons. Os dados interpolados pelo referido programa foram utilizados no MohidGIS para diminuir o peso das perdas pela interpolação do programa para a confecção do domínio do modelo.

3.2.2 - Dados hidrográficos

Os dados hidrográficos e correntométricos que foram utilizados na implementação, calibração e validação do modelo, foram coletados em estações fixas (Figura 3.1) com intervalo de amostragem de 0,5h durante um ciclo semidiurno de maré (13h) em condições de quadratura e de sizígia.

As coletas foram realizadas com o uso de perfiladores de temperatura e salinidade (CTDs), dados de corrente com aparelhos do tipo Valeport e Falmouth, e dados de turbidez com o uso de voltímetros. Os dados de maré foram adquiridos de fundeios em Caravelas. Como as simulações foram realizadas integradas verticalmente, os dados utilizados para a calibração e validação do modelo são as médias verticais de cada perfil.

Os dados de velocidade de corrente e variação de maré, foram fornecidos pelo Prof. Dr. Luiz Bruner de Miranda, Prof. Dr. Carlos Augusto Schettini e MSc. Cássia Pianca Barroso. As medidas referentes à variação

horária de velocidade foram integradas verticalmente, uma vez que foram realizadas simulações bidimensionais.

Figura 3.1 – Estações de coleta de dados hidrográficos das campanhas de 2007 e 2008.

3.3 - Modelagem Numérica

Uma simulação com forçamento barotrópico e bidimensional foi adotada. A primeira opção deve-se ao fato de o forçamento hidrodinâmico induzido pelas variações de densidade ser menos importante que o forçamento pela maré, na área de estudo.

Para a modelagem hidrodinâmica é necessário o estabelecimento de condições de contorno horizontais e verticais. Os contornos fechados, ou

contornos terrestres, são prescritos nos nós da malha que fazem fronteira com a terra, caracterizando as margens do corpo d'água e os possíveis afluentes.

Nos contornos terrestres não há fluxo de massas d'água perpendicularmente ao contorno, pois este é impermeável. Nestes casos adota-se então, como condição de contorno, as velocidades perpendiculares à fronteira como sendo nulas. Porém, nos limites do modelo em que os dois lados do contorno são de água, denominados fronteiras abertas, o fluxo não é nulo. Ao longo dos contornos abertos usualmente prescrevem-se as elevações de nível d'água e/ou as velocidades das correntes.

No estudo foram consideradas como condições de contorno terrestres as margens impermeáveis e descargas fluviais de pequena intensidade ($1,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) nos tributários do rio Caravelas. Para o rio Peruípe, uma descarga variável representando condições de estiagem e de período chuvoso, para a fase de calibração e validação do modelo foi considerada uma descarga fluvial com o valor de $20,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Como condição de contorno nas fronteiras abertas utilizou-se a série temporal de nível d'água medida no período da campanha. Na superfície, a condição de contorno considerada foi a de fluxo nulo e no fundo foi considerada a altura da rugosidade para um perfil logarítmico de velocidade.

Para a simulação da circulação hidrodinâmica através do Mohid é necessário fornecer condições iniciais de elevação da superfície livre e de velocidade, e foram adotados nível constante e velocidade nula em todo o domínio.

O domínio do modelo e a sua batimetria são apresentados na figura 3.2. Corresponde a uma área de $42 \times 51 \text{ km}$, com um total de 249776 pontos de cálculo sendo a grade composta por 466 células no sentido leste-oeste e 564 no sentido norte-sul, com resolução espacial de 90 m.

Ao longo de todo o domínio foram distribuídos alguns pontos (séries temporais dos resultados do modelo), de forma a contemplar possíveis variações no escoamento, englobando os pontos de coleta de dados realizada nas campanhas de janeiro de 2008.

Figura 3.2 – Domínio adotado na simulação, com 466x536 pontos de cálculo. As áreas em verde representam os mangues. Na figura as linhas de grade representam duas células.

3.3.1 - Experimentos

Com o modelo devidamente calibrado e validado, para as condições hidrodinâmicas, foram realizados alguns experimentos. Estes partiram dos pressupostos que se queria investigar e incluíram diferentes condições de contorno e as respostas do ambiente foram avaliadas.

Em todos os experimentos foram avaliadas as respostas quanto à variação da hidrodinâmica local e ao transporte de sedimentos. Nas simulações foram consideradas uma concentração inicial constante de 30 mg/L, foi introduzida, junto às descargas fluviais, concentrações de 50 mg/L. A tensão crítica para deposição foi de 0,40 Pa e, junto ao fundo, foi considerado um valor

de $0,5 \text{ kg/m}^2$ de sedimento. A velocidade de queda das partículas foi considerada constante e igual a $1,5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$.

Experimento 1A

O primeiro experimento consistiu em realizar simulações considerando uma descarga fluvial considerada típica para um período chuvoso, com alta descarga para o rio Peruípe em um período de maré de quadratura.

Experimento 2A

Neste experimento foi considerado um período de sizígia para a variação de maré com a descarga fluvial do experimento anterior.

Experimento 3A

Neste experimento as simulações foram feitas levando-se em consideração uma descarga fluvial menos intensa, representando um período de estiagem para o rio Peruípe em um período de maré de quadratura.

Experimento 4A

Neste experimento foi considerado um período de sizígia para a variação de maré com a descarga fluvial do experimento anterior.

Experimentos 1B a 4B

Esses experimentos consistiram das mesmas forçantes dos experimentos anteriores, indicados pelos numerais, e o índice B indica o fechamento dos canais entre os rios Caravelas e Peruípe. A intenção foi de avaliar a influencia desses canais no padrão de distribuição de sedimentos para o sistema.

4- CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

As maiores dificuldades relacionadas à aplicação de modelos numéricos advêm da calibração e validação dos resultados obtidos. Validar e calibrar um modelo significa determinar se a simulação apresentada é uma representação realística do processo investigado para uma dada região.

A calibração e validação de um modelo podem ser realizadas comparando os dados gerados com dados observados ou com os resultados de outros modelos que já tenham sido objeto de calibração e validação para a mesma região. Com esse objetivo, os resultados das simulações foram comparados com os dados de campo das campanhas de 2007 e 2008.

Segundo van Rijn *et al.* (2003), a média relativa do erro absoluto (do inglês, "Relative Mean Absolut Error-RMAE"), é um parâmetro estatístico que pode ser utilizado para avaliar a qualidade da performance do modelo. Na formulação proposta os erros são corrigidos dos erros de medição, assegurando uma melhor avaliação do parâmetro. O valor de RMAE é obtido como se segue:

$$RMAE = \frac{\langle |S - O| - EM \rangle}{\langle |O| \rangle} \quad (20)$$

Onde, $\langle |S - O| \rangle$ é o erro absoluto médio entre os dados observados (O) e os dados da simulação (S); EM é o erro associado às medidas da velocidade, e que, segundo van Rijn *et al.* (2003) é igual a 0,05 m/s; $\langle |O| \rangle$ é a média dos valores absolutos dos dados observados.

Os valores de RMAE fornecem uma avaliação qualitativa da eficiência da simulação, baseada em dados quantitativos, sendo que segundo os seus valores as simulações podem ser classificadas de acordo com a tabela 4.1. Os dados referentes à variação de maré também foram classificados tendo por base a mesma tabela.

Tabela 4.1 - Qualidade dos resultados do modelo com base na variação do RMAE para as velocidades de acordo com van Rijn *et al.* (2003).

Qualidade	Velocidade
Excelente	< 0.1
Bom	0.1 – 0.3
Razoável	0.3 – 0.5
Pobre	0.5 – 0.7
Ruim	> 0.7

Nesse procedimento foram geradas séries temporais com frequência de saída de 0,5h para o período de simulação que corresponderam aos intervalos de coleta de dados para as estações A, B e C (Figura 3.2). A comparação dos resultados obtidos com a aplicação do modelo e os valores observados foi realizada utilizando os valores das seguintes variáveis: variação do nível; intensidade da corrente e as suas componentes.

A calibração é um processo no qual os parâmetros físicos e numéricos do modelo são ajustados. Para a calibração do modelo Mohid podem ser utilizados o parâmetro relacionado à rugosidade do fundo, a batimetria na forma da grade numérica utilizada, as condições de contorno e o passo temporal.

No presente estudo utilizou-se a rugosidade do fundo, as condições de contorno e diferentes domínios de grade. O passo temporal (dt) foi limitado à condição de estabilidade do modelo e também ao tempo de execução do mesmo. Como o modelo permite considerar um número de Courant elevado, até aproximadamente 10, foi escolhido um passo de 24s. Nas simulações em que foram utilizados os aninhamentos, esse passo temporal manteve a mesma relação que as grades numéricas, ou seja, um fator de 3.

O cenário comum aos três métodos utilizados para a calibração (parâmetros físicos e numéricos, tabela 4.2) foi construído com base em resultados preliminares de análises de sensibilidade e as simulações foram realizadas para o período de coleta dos dados na condição de maré de sizígia em 2008. Os resultados apresentados são referentes às estações A e C por serem aquelas que apresentaram os melhores ajustes entre as variáveis consideradas na calibração do modelo.

Tabela 4.2 – Parâmetros físicos e numéricos utilizados na calibração do modelo

Parâmetro	Resolução da grade (m)		
	45	90	270
Pontos de cálculo	480128	249776	76431
Passo temporal (s)	8	24	48
Período de simulação	38h 20min	38h 20min	38h 20min
Viscosidade vertical (Ns/m ²)	0.001	0.001	0.001
Viscosidade horizontal (Ns/m ²)	8	8	8
Descarga fluvial* (m ³ /s)	1 e 20	1 e 20	1 e 20

*descarga fluvial variável de acordo com a localização

4.1 Condição de contorno

A calibração foi realizada utilizando dois tipos de entradas de dados como condição de contorno referente à maré. O primeiro foi considerar as constantes harmônicas fornecidas pelo modelo global FES2004, seguindo a metodologia aplicada em diversos estudos que utilizaram o Mohid. A outra simulação teve como condição de contorno aberta a série temporal de maré medida na estação A.

Com relação ao domínio do modelo foi considerado um aninhamento entre as grades de 270 m, de 90 m e de 45m de resolução (Figura 4.1). Já com relação ao parâmetro de rugosidade do fundo, foi adotado um valor constante e igual a 0,0010 m para os três domínios.

Figura 4.1 - Domínios dos modelos aninhados, o espaçamento de grade obedece a uma relação de no máximo 1/3 entre o modelo pai e seu aninhado. Grades com espaçamento de 270 m(a), 90 m(b) e 45 m(c), as áreas em branco representam os mangues.

Os resultados mostraram que, quando foram impostas as constantes harmônicas do modelo global, houve um atraso de fase da ordem de 20 minutos entre os resultados do modelo e os dados de campo, sendo esta condição de contorno considerada como de baixa qualidade (Figura 4.2).

Figura 4.2 – Série temporal do nível (a), da velocidade longitudinal (b) e do módulo da velocidade (c) para a estação A, tendo como condição de contorno as constantes harmônicas do modelo global FES2004. Linha contínua representa os resultados do modelo e o símbolo "+" os dados medidos.

Quando se considerou a série medida na estação A como condição de contorno, os níveis apresentaram boa concordância entre as simulações e as medidas. Desta forma procedeu-se a calibração tendo como condição de contorno os níveis medidos na estação A. A figura 4.3 apresenta os níveis d'água registrados e simulados para a estação A.

Figura 4.3 – Série temporal do nível (a), da velocidade longitudinal (b) e do módulo da velocidade (c) para a estação A, tendo como condição de contorno a série temporal medida na estação A. Linha contínua representa os resultados do modelo e o símbolo "+" os dados medidos.

Os resultados estatísticos para as duas condições de contorno são apresentados nas figuras 4.2 e 4.3, de onde se conclui que a condição de contorno que apresentou melhor qualidade foi a que considerou a série dos dados observados.

4.2 Rugosidade do fundo

Com a condição de contorno calibrada outro parâmetro foi utilizado para avaliar a qualidade do modelo, tendo em vista principalmente as velocidades geradas. Nessa etapa foi escolhido o parâmetro de rugosidade do fundo para efetuar a calibração das velocidades e o aninhamento entre as grades foi mantido.

Durante a calibração, dois coeficientes de rugosidade, constantes para todo o domínio, foram testados. O critério de escolha dos coeficientes testados foi embasado em análise de sensibilidade do modelo quanto à variação deste parâmetro onde foi constatado que coeficientes de rugosidade maiores ou igual a 0,0025 m causaram defasagem tanto na série do nível quanto nas velocidades e, coeficientes menores que 0,0006 m resultaram em instabilidades numéricas podendo o modelo nem completar todo o período de simulação. Desta forma, para a calibração do modelo foram utilizados coeficientes de rugosidade de 0,0010 e 0,0008 m.

Os resultados da calibração estão representados nas figuras 4.4 e 4.5 através da comparação entre os níveis e velocidades observados e simulados. Os resultados estatísticos estão presentes nas mesmas figuras, sob a sigla RMAE nos subtítulos.

Figura 4.4 – Série temporal do nível (a), da velocidade longitudinal (b) e do módulo da velocidade (c), para a estação A, a rugosidade do fundo foi considerada 0,0010 m. Linha contínua representa os resultados do modelo e o símbolo "+" os dados medidos.

Figura 4.5 – Série temporal do nível (a), da velocidade longitudinal (b) e do módulo da velocidade (c), para a estação A, a rugosidade do fundo foi considerada 0,0008m. Linha contínua representa os resultados do modelo e o símbolo "+" os dados medidos.

De acordo com estes resultados e a comparação com a tabela 4.1, a simulação pode ser considerada boa com relação às velocidades e ao nível.

O coeficiente de rugosidade de 0,008 m foi deste modo, o escolhido para a etapa seguinte da calibração do modelo.

4.3 Grade numérica

Em virtude de melhorar o tempo computacional optou-se por realizar simulações considerando diferentes resoluções de grade e comparar os resultados entre os dados de campo e cada uma das grades e entre as grades numéricas.

Neste procedimento foi mantido o aninhamento entre as grades de 270 e 45 m, e foram considerados outros dois aninhamentos, entre a grade de 270 e 90 m e entre as grades de 90 e 45 m. Além destes foi realizada uma simulação considerando apenas a grade de 90 m de resolução.

Do ponto de vista de execução do modelo a grade de 90x90 m se apresentou a melhor solução. Para simular um período de 9,5 dias, levou aproximadamente 35 horas. Na tabela 4.3 são apresentados os tempos de execução de cada simulação para um período de 38h40min.

Do ponto de vista estatístico (Tabelas 4.4 e 4.5), ao comparar os resultados para a grade mais grosseira (90 m) e para o aninhamento entre as grades de 90 e 45 m foi possível observar que não há diferenças significativas ao adotar a de menor resolução.

Tabela 4.3 - Tempo (aproximado) gasto em cada simulação e pontos de cálculo

	Período:22/01/2008 05h40 min a 23/01/2008 20h00 min (38h20 min)	Pontos de cálculo
270a45	24h30 min	806.335
270a90	08h20 min	326.207
90a45	19h20 min	729.904
90	03h50 min	249.776 (466x536)
270	Não se aplica	76.431 (349x219)
45	Não se aplica	480.128 (682x704)

Tabela 4.4 – Resultados estatísticos para a calibração do modelo quanto a consideração ou não do aninhamento de grade. Comparação entre os resultados de campo e, as grades aninhadas e a grade de 90 m

	270a45	270a90	90a45	90
	Módulo			
Observado	0.671			
Modelo	0.696	0.643	0.630	0.626
RMSE	0.161	0.176	0.142	0.162
R2	0.725	0.672	0.797	0.732
Eficiência	0.713	0.660	0.778	0.709
	U			
Observado	-0.027			
Modelo	-0.022	-0.022	-0.016	-0.017
RMSE	0.156	0.168	0.135	0.158
R2	0.949	0.939	0.962	0.947
Eficiência	0.947	0.938	0.960	0.945

Tabela 4.4 – Resultados estatísticos para a calibração do modelo quanto a consideração ou não do aninhamento de grade. Comparação entre os resultados de campo e, as grades aninhadas e a grade de 90 m (continuação)

	270a45	270a90	90a45	90
	V			
Observado	0.016			
Modelo	0.021	0.014	0.019	0.014
RMSE	0.115	0.108	0.091	0.096
R2	0.906	0.896	0.923	0.910
Eficiência	0.727	0.763	0.830	0.811
	Nível			
Observado	1.580			
Modelo	1.603	1.609	1.589	1.591
RMSE	0.091	0.089	0.109	0.076
R2	0.994	0.994	0.985	0.993
Eficiência	0.989	0.990	0.985	0.993

Tabela 4.5. - Resultados estatísticos para a calibração do modelo quanto a consideração ou não do aninhamento de grade. Comparação entre os resultados da grade de resolução de 90 m e as grades aninhadas

	270a45	270a90	90a45	270a45	270a90	90a45
	Módulo			V		
dx=90 m	0.630			-0.022		
Modelo	0.685	0.647	0.630	-0.012	-0.022	-0.012
RMSE	0.109	0.552	0.069	0.041	0.024	0.032
R2	0.908	0.963	0.936	0.986	0.994	0.988
Eficiência	0.834	0.958	0.934	0.978	0.993	0.987
	U			Nível		
dx=90 m	0.065			1.40592		
Modelo	0.056	0.062	0.055	1.404	1.420	1.391
RMSE	0.103	0.053	0.066	0.176	0.063	0.166
R2	0.984	0.994	0.989	0.967	0.997	0.966
Eficiência	0.973	0.993	0.989	0.961	0.995	0.966

5- RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados dos experimentos realizados com as simulações numéricas, para diferentes condições de maré e descarga fluvial.

Inicialmente serão apresentados os resultados para o comportamento da maré no sistema, com a representação da variação da amplitude em função da distância da desembocadura e as variações horárias do nível. Em sequência os resultados das distribuições longitudinais do sedimento em suspensão e no fundo para os rios e canais que compõem o sistema, e posteriormente os resultados referentes à distribuição das propriedades em todo o domínio do modelo. Em virtude da não consideração da erosão no módulo do transporte de sedimentos e com o objetivo de apresentar uma tendência para o transporte de sedimentos no interior do sistema, os resultados apresentados são a média temporal para todo o período considerado, sete dias, em cada simulação.

Os resultados dos experimentos realizados com os canais, entre os rios Caravelas e Peruípe, abertos e fechados serão agrupados, para um melhor entendimento das contribuições desses canais na dinâmica do sistema.

5.1 Padrão geral da circulação costeira e estuarina

Considerando um período de 14 dias de simulação o padrão de circulação para a área de estudo pode ser observado nas figuras 5.10 e 5.11.

As correntes de vazante são mais intensas que as correntes de enchente, efeito influenciado pelo atrito lateral e de fundo e também devido à descarga fluvial. No interior do sistema observa-se que a circulação tem um comportamento relacionado à morfologia, com intensidades maiores junto às concavidades do ambiente. Outra informação que pode ser obtida das figuras é que os canais preferenciais observados seguem os canais mais profundos para a região.

A existência de células de recirculação seria um efeito da topografia do fundo e da rugosidade, devido a existência de recifes de coral e da mudança

abrupta de profundidade. Esse padrão foi encontrado por Cabral *et al.* (2001) em um estudo realizado com imagens de satélite para a região.

Na região do oceano adjacente observa-se que, para o período, a corrente média foi orientada no sentido noroeste-sudeste, e sua magnitude foi inferior a apresentada pelas corrente no interior do sistema estuarino. Essa orientação preferencial tem relação com o alinhamento da costa.

As maiores velocidades ocorrem nas regiões da desembocadura do rio Peruípe em Nova Viçosa e na desembocadura do rio Caravelas. Uma maior intensidade do fluxo também ocorre na região onde há a confluência dos tributários do rio Caravelas. Essas seriam as regiões em que a deposição dos sedimentos estaria prejudicada e haveria uma maior erosão do fundo, de fato são regiões em que as simulações apresentaram maior valor para o parâmetro de tensão no fundo.

No interior dos canais entre as duas cidades também é possível observar células de recirculação nas regiões em que há um considerável aumento na área de seção transversal e novo afinilamento, são regiões em que haveria maior deposição de sedimentos.

O padrão de circulação permite fazer algumas especulações quanto ao comportamento do transporte de sedimentos em suspensão. Esse padrão geral evidenciaria um comportamento esperado para regiões de maior probabilidade de deposição e acúmulo de sedimentos, uma vez que o fluxo não teria capacidade de remobilizá-los. Outra observação que poderia ser feita é a de que nas células de recirculação haveria maior concentração de sedimentos em suspensão uma vez que os mesmos ficariam aprisionados e um movimento descente seria favorecido nas células com sentido horário.

Figura 5.1.a - Correntes médias para um período de 14 dias de simulação. A escala de cor representa o módulo e os vetores, a direção de velocidade, média para o período de 14 a 28/01/2008.

Figura 5.1.b e c - Correntes médias para um período de 14 dias de simulação. A escala de cor representa o módulo e os vetores, a direção de velocidade, média para o período de 14 a 28/01/2008.

5.2 Propagação da onda de maré no interior do sistema

Nas figuras 5.2.a e 5.2.b são apresentadas as posições das longitudinais dos tributários do rio Caravelas e do rio Peruípe extraídas da saída das simulações. A variação do nível no interior do sistema estuarino Caravelas-Nova Viçosa apresenta comportamentos distintos. A onda de maré para o rio Caravelas e seus tributários se comporta como uma onda estacionária com pequenas diferenças de tempo entre os níveis máximos e mínimos em três pontos distintos do estuário. Essa diferença de fase é da ordem de 15 minutos para distâncias da ordem de 10 km (Figuras 5.3 e 5.4). Os níveis máximos alcançados pela maré foram de 2,81 m a 2,84 m, os mínimos de -0,46 m a -0,39 m, com médias variando entre 1,29 m e 1,27 m. Em todos os tributários do rio Caravelas foi possível observar uma amplificação de 0,25 m a 0,35 m para o período de quadratura (Figura 5.7a) e de 0,20 m a 0,40 m para a sizígia (Figura 5.7b), da amplitude da onda de maré.

Para rio Peruípe no período de quadratura (Figura 5.5) os níveis máximos variaram de 1,68 m a 1,97 m, mínimos de 0,15 m a 0,54 m e as magnitudes máximas das correntes de enchente e de vazante variaram entre 0,33 m/s e 0,49 m/s e 0,30 m/s e 0,59 m/s. Os valores máximos variaram entre 2,35 m e 2,64 m, os mínimos entre -0,26 m e 0,84 m, e os níveis médios entre 1,28 m e 1,53 m para o período da sizígia (Figura 5.6), as máximas correntes de enchente e vazante variaram entre 0,26 m/s e 0,73 m/s e 0,37 m/s e 0,81 m/s, respectivamente. Neste caso ocorreu uma atenuação na altura da onda de maré em direção à cabeceira do estuário, para o período de sizígia essa atenuação foi de 0,45 m e de 1,0 m na quadratura. Os períodos de enchente e vazante foram semelhantes e de aproximadamente 6h.

Figuras 5.2 – Posição das longitudinais nos tributários do rio Caravelas (a) e no rio Peruípe (b).

Figura 5.3 – Variação horária da maré em três pontos de controle ao longo das longitudinais dos tributários do rio Caravelas, para um período de sizígia. Os índices indicam as longitudinais: (a) Caravelas-Macaco, (b) Caravelas-Massangano e (c) Caravelas-Jaburuna.

Figura 5.4 – Variação horária da maré em três pontos de controle ao longo das longitudinais dos tributários do rio Caravelas, para um período de sizígia. Os índices indicam as longitudinais: (a) Caravelas-Cupido e (b) Caravelas-Poço.

Figura 5.5 – Variação horária da maré em três pontos de controle para um período de quadratura na longitudinal do rio Peruípe.

Figura 5.6 – Variação horária da maré em três pontos de controle para um período de sizígia na longitudinal do rio Peruípe.

Figura 5.7 – Variação da amplitude da maré ao longo dos tributários do rio Caravelas, para um período de quadratura (a) e de.sizígia (b). Os números na figura indicam as longitudinais: (1) Caravelas-Macaco, (2) Caravelas-Massangano e (3) Caravelas-Jaburuna, (4) Caravelas-Cupido, (5) Caravelas-Poço.

Figura 5.8 – Variação da amplitude da maré ao longo do rio Peruípe, para um período de quadratura e de sizígia.

5.3 Experimentos numéricos

5.3.1 – Experimentos 1A e 1B

Os resultados dos experimentos numéricos para as condições em que os canais foram considerados fechados não apresentaram muitas diferenças daquelas em que os mesmos foram considerados abertos.

As figuras 5.9 a 5.14 apresentam as variações longitudinais da concentração de sedimento em suspensão e da disponibilidade de sedimento por unidade de área. Para o período de quadratura, quando os canais foram fechados houve uma diminuição na concentração dos sedimentos em suspensão e aumento na deposição. Das figuras ainda é possível observar que as formas das curvas dessas variações são semelhantes entre os diferentes experimentos, em algumas regiões as curvas se sobrepõem indicando que a influência dos canais na distribuição dos sedimentos é negligenciável.

A longitudinal que apresenta a maior diferença entre as simulações com os canais fechados é a da figura 5.13, que representa o rio do Poço, do conjunto de figuras também se observa que as diferenças entre as simulações com os canais abertos (linha azul) e fechados (linha vermelha), apresentadas com o índice "c", são sempre positivas indicando que há maior quantidade de material em suspensão com os canais abertos, exceção é feita para o rio Peruípe que apresentou diferenças negativas, indicando que com os canais fechados a concentração em seu interior é maior.

A concentração diminui em direção à cabeceira dos rios, com mínimos variando entre 4 e 4,5 mg/L, no fundo a variação foi de 0,55 a 0,67 kg/m². Como o rio Peruípe foi considerado área fonte as maiores concentrações foram obtidas em seu interior, a variação foi de 7,0 a 16 mg/L, com os menores valores na desembocadura.

Figura 5.9 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Macaco) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.10 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Massangano) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.11 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Jaburuna) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.12 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Cupido) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.13 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Poço) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.14 – Distribuição longitudinal (Peruípe) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Considerando as figuras 5.15 e 5.16, em que são apresentadas as médias no tempo da concentração do sedimento em suspensão e no fundo, nota-se que no interior dos canais, na região do rio do Poço e na entrada dos canais as concentrações são aproximadamente de 8 mg/L. No fundo há maior disponibilidade de sedimentos no interior dos canais e quando estes estão fechados o sedimento acumula com maior intensidade na região de Caravelas.

Figura 5.15 – Campo residual do sedimento em suspensão (mg/L) para um período de maré de quadratura e descarga fluvial de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ para o rio Peruípe.

Figura 5.16 – Campo residual do sedimento de fundo (kg/m^2) para um período de maré de quadratura e descarga fluvial de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ para o rio Peruípe.

5.3.2 – Experimentos 2A e 2B

Na sizígia a concordância entre as curvas das variações da concentração de sedimentos em suspensão foi maior do que a apresentada para a quadratura (Figuras 5.17 a 5.24) e as concentrações foram menores. Com relação à carga de fundo, houve concordância entre as duas condições de maré. Novamente a maior diferença ocorreu na longitudinal do rio do Poço, evidenciando que há contribuição dos canais para essa região.

A variação na concentração de sedimentos em suspensão foi de 4 a 7,6 mg/L nos tributários e de 6,15 a 15,8 mg/L para o rio Peruípe. No fundo as diferenças entre as duas simulações foi de ordem 10^{-2} e em suspensão de ordem 10^{-1} , nesse caso as diferenças foram tanto positivas quanto negativas.

Figura 5.17 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Macaco) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.18 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Massangano) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.19 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Jaburuna) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.20 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Cupido) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.21 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Poço) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.22 – Distribuição longitudinal (Peruípe) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de 50 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

As figuras 5.23 e 5.24 mostram as variações médias no tempo para os sedimentos e a partir delas se observa maiores concentrações no interior dos canais e no rio do Poço, e também uma maior concentração de sedimento em suspensão nas desembocaduras do sistema.

No fundo um maior acúmulo foi observado para a região dos canais e quando estes foram fechados ocorreu maior deposição na desembocadura mais ao sul do sistema, em Nova Viçosa. Em Caravelas ocorreu maior deposição no interior dos rios tributários sendo que o rio do Poço foi de maior acumulação.

Figura 5.23 – Campo residual do sedimento em suspensão (mg/L) para um período de maré de sizígia e descarga fluvial de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ para o rio Peruípe.

Figura 5.24 – Campo residual do sedimento de fundo (kg/m^2) para um período de maré de sizígia e descarga fluvial de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ para o rio Peruípe.

5.3.3 – Experimentos 3A e 3B

Nas simulações realizadas com baixa descarga fluvial os resultados apresentaram diferenças significativas com relação às outras simulações, tanto para a maré de quadratura quanto para a sizígia. Os principais resultados serão apresentados a seguir, seguindo a mesma sequência dos resultados anteriores, primeiramente as simulações para a quadratura e em seguida para a sizígia. As distribuições longitudinais são para as mesmas regiões e suas localizações encontram-se na figura 5.2.

Das figuras 5.25 a 5.30 se observa que as diferenças nas simulações foram da ordem da unidade, sendo os maiores valores apresentados pela condição de fechamento dos canais. As curvas se assemelham e indicam uma diminuição da concentração estuários acima. As variações foram de 4 a 8,6 mg/L e no rio Peruípe de 7 a 11 mg/L, no fundo as oscilações seguiram as simulações anteriores variando entre 0,55 e 0,67 kg/m².

Figura 5.25– Distribuição longitudinal (Caravelas-Macaco) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 15 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.26 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Massangano) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.27 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Jaburuna) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.28 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Cupido) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.29 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Poço) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.30 – Distribuição longitudinal (Peruípe) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de quadratura e descarga fluvial de 15 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

A média para todo o domínio (Figuras 5.31 e 5.32) indica que uma quantidade maior de sedimentos permaneceu retida no interior do rio Peruípe e dos canais. No fundo a maior disponibilidade pode ser observada em Caravelas e no rio do Poço.

Figura 5.31 – Campo residual do sedimento em suspensão (mg/L) para um período de maré de quadratura e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ para o rio Peruípe.

Figura 5.32 – Campo residual do sedimento de fundo (kg/m^2) para um período de maré de quadratura e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ para o rio Peruípe.

5.3.4 – Experimentos 4A e 4B

Das figuras 5.33 a 5.38 se observa que as diferenças nas simulações foram todas positivas, e com valores atingindo 2 mg/L, indicando que com os canais abertos havia maior concentração de sedimentos em suspensão do que aquelas apresentadas pela condição de fechamento dos canais. As curvas se assemelham e indicam uma diminuição da concentração estuários acima. As variações foram de 4 a 8,3 mg/L e no rio Peruípe de 7 a 11 mg/L, no fundo as oscilações seguiram as simulações anteriores variando entre 0,55 e 0,7 kg/m² com pequenas diferenças entre as simulações com os canais fechados e abertos.

Figura 5.33 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Macaco) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de 15 m³/s no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.34 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Massangano) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.35 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Jaburuna) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.36 – Distribuição longitudinal (Caravelas-Cupido) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.37– Distribuição longitudinal (Caravelas-Poço) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Peruípe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Figura 5.38— Distribuição longitudinal (Caravelas-Peruípe) do sedimento em suspensão e no fundo para um período de sizígia e descarga fluvial de 15 m³/s no rio Perúpe. A cor azul indica experimento com os canais abertos e a vermelha com os canais fechados.

Novamente houve maior retenção do sedimento em suspensão no interior do rio Perúpe e, nos canais entre as duas cidades ocorreu uma deposição mais intensa (Figuras 5.39 e 5.40).

Figura 5.39 – Campo residual do sedimento em suspensão (mg/L) para um período de maré de sizígia e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ para o rio Peruípe.

Figura 5.40 – Campo residual do sedimento de fundo (kg/m^2) para um período de maré de sizígia e descarga fluvial de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ para o rio Peruípe.

6- DISCUSSÃO

Em termos gerais, o sistema estuarino é controlado, principalmente, pela oscilação da maré e, em menor grau, pela descarga fluvial. O sistema de correntes do estuário apresentou variações de direção e intensidade vinculadas às oscilações da maré. Também se verificou, através da circulação residual, que longitudinalmente as intensidades diminuem estuário acima. Os vetores de direção de correntes obedeceram dois padrões, o sentido do fluxo de maré, evidenciando a existência de canais preferências do escoamento, e a geometria do corpo estuarino, através da constrição do fluxo e aumento na intensidade das correntes, formando jatos nas duas desembocaduras.

As interações do escoamento, forçado pela maré, com o fundo através do atrito e com a geometria fazem com que a onda seja distorcida à medida que progride para o interior do estuário. Alguns pesquisadores sugerem que a duração da assimetria é controlada pela variação da área de superfície estuarina relativa área da seção transversal do canal durante o ciclo de maré (e.g. Nummedal & Humphries, 1978; FitzGerald & Nummedal, 1983 *apud* Speer & Aubrey, 1985).

No interior do sistema há grandes áreas sujeitas à inundação que armazenam água durante a enchente liberando-a na vazante, este efeito provoca uma distorção da onda de maré no interior do estuário tornando o estuário com vazante dominante. O período de enchente prolonga-se devido ao enchimento dessas regiões e as correntes de vazante são mais intensas devido ao jato produzido no abaixamento do nível da água.

Schettini e Miranda (2010) classificaram o estuário do rio Caravelas como sendo do tipo bem misturado, e de acordo com Dyer (1977) estuários bem misturados, com pequena descarga fluvial e com regime de meso ou macromaré são caracterizados por dominância de correntes de vazante que resulta num fluxo residual de material particulado em suspensão em direção ao oceano.

O rio Caravelas e seus tributários apresentam como característica uma diminuição da área de seção transversal ao longo das longitudinais consideradas, essa convergência das margens pode gerar uma reflexão parcial

da onda e como consequência amplificar a sua altura. Nichols e Biggs (1985) classificam esses tipos de estuários como hipersincrônicos, em que o efeito da convergência das margens sobrepuja o da fricção.

No caso do rio Peruípe, seguindo a mesma classificação, o estuário é considerado como sendo do tipo hipossincrônico. Nesse tipo de estuário o efeito da fricção é dominante e a altura diminui estuário acima. A energia da onda é dissipada por fricção antes da reflexão ou em virtude do comprimento do canal.

Com relação ao transporte de sedimentos algumas considerações iniciais devem ser feitas, os resultados devem ser observados de forma qualitativa, pois foi imposta uma limitação nas simulações. A erosão do fundo não foi considerada nas simulações em função da ocorrência de regiões com alta tensão de cisalhamento do fundo. Para condições de maré de sizígia e alta descarga fluvial a tensão assumiu valores da ordem de 12 N/m^2 , e nas simulações com pequena descarga fluvial e maré de quadratura, que representam as condições de menor intensidade do fluxo, a tensão foi da ordem de 6 N/m^2 . Em virtude desses altos valores não é possível estabelecer uma tensão crítica para a erosão de forma realística e também calcular a velocidade de sedimentação em função da concentração de sedimentos em suspensão, por esse motivo foi escolhida uma velocidade constante. Essa limitação não é impeditiva na avaliação dos processos de forma que os resultados apresentados indicam uma tendência no transporte de sedimentos tendo o rio Peruípe como única área fonte.

Outra limitação encontrada no trabalho esteve relacionada com a região no limite sudeste do domínio do modelo. Nessa região foi possível observar que há maior deposição de sedimentos, esse padrão observado tem relação com a proximidade desta região com a fronteira do domínio do modelo. Os recifes de coral foram representados como domínios terrestres não sujeitos a inundação e estabeleceram uma barreira para o fluxo, sendo assim a circulação residual foi menos intensa propiciando condições para a deposição.

No sistema estuarino as concentrações foram decrescentes estuário acima em todos os experimentos realizados e as diferenças foram de pequena magnitude. Schettini e Miranda (2010) encontraram padrão semelhante, com valores mais elevados na desembocadura do rio Caravelas diminuindo estuário

acima até o limite de 9 km (quadratura) e de 16 km (sizígia) de distância permanecendo estável posteriormente. Para o rio Peruípe essa distribuição foi inversa, com concentrações aumentando em direção à cabeceira do rio.

Segundo Allersma (1980), na maioria dos estuários há uma tendência de transporte de sedimentos finos em direção ao oceano, essa característica foi observada em todas as simulações e tem correlação com o campo residual das correntes.

O efeito da abertura e fechamento dos canais não provocou grandes alterações no padrão de distribuição dos sedimentos. As formas das curvas de variações do sedimento em suspensão e no fundo, e as concentrações médias mostram que os maiores valores foram observados próximos à área fonte e em uma área em que o fluxo é restringido pela presença de corais, mais ao sul do domínio do modelo.

Do ponto de vista qualitativo, e tendo como base os experimentos realizados, com o fechamento e abertura dos canais, pode-se afirmar que existe correlação entre a região do estuário do rio Peruípe e o do rio Caravelas. Em condições de regimes de fluxo mais intensos, a concentração de sedimentos em suspensão foi maior nos tributários quando os canais permaneciam abertos. Essa situação não ocorreu apenas para a condição em que a descarga fluvial era baixa em maré de quadratura.

As simulações foram realizadas com o modelo integrado verticalmente, não considerando os efeitos baroclínicos do escoamento, o que para o estuário do rio Caravelas é uma boa aproximação, contudo para o rio Peruípe pode representar uma limitação da modelagem uma vez que apresenta alta descarga fluvial se comparado a Caravelas. Os efeitos da descarga fluvial do rio Peruípe podem influenciar os resultados do modelo tanto na parte hidrodinâmica quanto no transporte de sedimentos, em função do efeito de floculação dos sedimentos coesivos.

7- CONCLUSÕES

A modelagem numérica mostrou ser uma ferramenta eficiente no estudo dos ambientes costeiros da área de estudo permitindo entender a dinâmica dos principais processos da área de estudo. Com base no conjunto de resultados apresentados algumas considerações podem ser feitas sobre o sistema:

- O modelo mostrou-se eficiente para as simulações da hidrodinâmica da área de estudo, com os dados de campo ele pode ser devidamente calibrado e os experimentos puderam ser realizados.
- A hidrografia e o transporte de sedimentos são modulados pela maré, sendo o aporte de água doce menos relevante para o sistema.
- O padrão de circulação para a região mostrou um sentido de orientação que segue a orientação da linha de costa, com maiores velocidades nas desembocaduras dos sistemas e formação de células de recirculação no interior do estuário e próximas as desembocaduras. A circulação residual mostrou a dominância de maré vazante.
- No que diz respeito à simulação do transporte de sedimentos, a calibração e validação dos modelos não pode ser realizada, principalmente devido à falta de ajuste quanto ao parâmetro de tensão do fundo, em algumas regiões este parâmetro assumiu valores muito altos, da ordem de 12 N/m^2 para velocidades da ordem de $0,5 \text{ m/s}$, sendo que nas simulações não foram considerados a ação combinada de ondas e correntes. Dessa forma as tensões críticas de deposição e erosão não puderam ser ajustadas de forma satisfatória, a consideração de um valor elevado que acompanhasse as variações deste parâmetro em determinados locais, ocasionariam uma acentuada deposição em regiões onde esse fenômeno não é observado. Deste modo pode-se dizer que o modelo não poder ser considerado uma boa

ferramenta para a simulação dos fenômenos de transporte de sedimentos finos de forma quantitativa e os seus resultados são apenas indicativos do comportamento destes sob certas condições específicas. No entanto, esta limitação não deve ser encarada como impeditiva da utilização do modelo, uma vez que os resultados que são possíveis de obter podem conduzir a ganhos significativos de qualidade no que toca ao conhecimento do sistema e ao tipo de resposta a esperar na sequência de determinada ação, mesmo que só possam ser encarados do ponto de vista qualitativo.

- Do ponto de vista dos processos que atuam no transporte de sedimentos finos em ambientes costeiros, foi possível observar a influência das diferentes condições de maré na deposição. A influência da variação da descarga fluvial também pode ser observada, não no aspecto da diluição da água salina, e consequente aumento ou diminuição da floculação, mas sim na forma de um fluxo contrário ao da maré estuário acima. O transporte de sedimentos foi mais efetivo em condições de marés de sizígia e com descargas fluviais mais intensas.
- O fechamento dos canais evidenciou a influência do rio Peruípe para a contribuição do sedimento em suspensão na região de Caravelas, o ajuste da tensão de cisalhamento de fundo permitiria quantificar essa influência com as diferentes condições forçantes do escoamento.

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allersma, E. 1980. Mud in estuaries and along coasts. *In*: International symposium on river sedimentation. Beijing. China. 663-685p.
- ANDRADE, A. C. S. 2000. Evolução quaternária da planície Costeira de Caravelas – extremo Sul do Estado da Bahia. Salvador. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 162 p.
- Andrade, A. C. S.; Dominguez, J. M. L.; Martin, L.; Bittencourt, A. C. S. P. 2003. Quaternary evolution of the Caravelas strandplain – Southern Bahia State – Brazil. *In*: Anais da Academia Brasileira de Ciências (2003). 75 (3): 357-382 p.
- Azevedo, I.F.; Guerra, J.V.; Cabral, A.P. 2005. Evolução geomorfológica de pontais arenosos associados à foz de rios na orla da planície de Caravelas-BA. Anais X Congresso da ABEQUA, Guarapari, ES. 6 pp. CD-Rom.
- Bittencourt, A. C. S. P.; Dominguez, J. M. L.; Martin, L.; Nascimento, I. R. 2000. Patterns of sediment dispersion coastwise the state of Bahia – Brazil. *Na. Acad. Bras. Ci.* 72(2): 271-287.
- Burchard, H; Baumert, H. 1998. The formation of estuarine turbidity maxima due to Density effects in the salt wedge. *In*: A hydrodynamic process study, *Journal Phys. Oceanogr.*, 28, 309-321.
- Cabral, A. P.; Baptista, M. C.; Hargreaves, F.; Gherardi, D. F. M.; Mano, M. 2001. Caracterização de feições oceanográficas e sedimentares na região dos bancos Royal Charlotte e dos Arolhos (BA, Brasil), através dos dados SAR/ERS-1/2, AVHRR/NOAA, Difusômetro/ERS/2, Topex/Poseidon e TM/Landst 5. Anais X SBSR, Foz do Iguaçu, 21-26 abril 2001, INPE, p.769-776. Sessão Técnica Oral – Workshops. Disponível em < <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2001/09.09.06/doc/0769.776.227.pdf> > Acesso em: 20/05/2007.
- Cameron, W. M.; Pritchard, D. W. 1963. Estuaries. *In*: Hill, M. N. (ed). *The Sea. Ideas and observatios on progress in the study of the seas*. New York, Interscience, 306-324 p.

- Campuzano, F.; Nunes, S.; Malhadas, M.; Nunes, D.; Jardim, M.; Neves, R.;.2009. Modelação da hidrodinâmica da orla sul da ilha da Madeira. *In*:. 6ª Jornada Portuguesa de Engenharia Costeira e Portuária. Disponível em < <http://maretec.mohid.com/PublicData/products/ConferencePapers/HidrodinâmicaMadeira.pdf> >. Acesso em 15/01/2010.
- CUNHA-LIGNON, M. 2001. Dinâmica do manguezal no sistema Cananéia-Iguape, Estado de São Paulo, Brasil. Dissertação de mestrado, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.
- Dalrymple, R. W.; Zaitlin, B.A.; Boyd, R. 1992. Estuarine facies models: Conceptual basis and stratigraphic implications. *In*: Journal of Sedimentary Petrology, 62. 1130 – 1146 p.
- Andrade, A. C. S.; Dominguez, J. M. L..2002. Informações Geológico-Geomorfológicas como Subsídios a Análise Ambiental: o Exemplo da Planície Costeira de Caravelas. *In*: Boletim Paranaense de Geociências, Paraná – Editora UFPR, v. 51, 9-17 p.
- Dronkers, J.1986. Tidal asymetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research* 20 (2/3): 117-131p.
- DUTRA, L. X. C. 2003. Os efeitos do aporte de sedimento na vitalidade dos recifes de corais de Abrolhos, Bahia. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. Salvador. Bahia. 91 p.
- Dyer, K. R.; Manning, A. J. 1999. Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions. *In*: Journal of Sea Research 41(1999): 87–95 p.
- Dyer, K. R. 1986. Coastal and estuarine sediment. Institute of Oceanographic Sciences, Bidston, UK.
- Dyer, K. R. 1988. Fine Sediment particle transport in estuaries. *In*: Dronkers, J. (Ed.), Physical processes in estuaries. Springer-Verlag, Berlin: 295-310 p.
- Dyer, K. R. 1997. Estuaries: a Physical Indroduction. Segunda Edição. New Yourk, John Wiley & Sons, 195 p.
- Dyer, K.R. 1995. Sediment transport processes in estuaries. *In*: Geomorphology and Sedimentology of Estuaries, G.M.E. Perillo (ed.). Developments in Sedimentology, 53. Elsevier Science, 423-449 p.

- Fairbridge, R. W. 1980. The estuary: its definition and geodynamic cycle. In: Olausson E, Cato I (eds) Chemistry and biogeochemistry of estuaries. Wiley.
- Friedrichs, C. T.; Aubrey, D. G. 1988. Non-linear Tidal Distortion. In: Shallow Well-mixed Estuaries: a Synthesis. Estuarine, Coastal and Shelf Science (1988) 27, 521-545 pp.
- Hansen, D. V.; Rattray, M. 1966. New dimensions on estuarine classification. Limnology and Oceanography, 11:319-326.
- Kjerfve, B. 1990. Manual for investigation of hydrological processes in mangrove ecosystems. Unesco/United Nations Development Program Regional Mangrove Project RAS 79/002 and RAS/86/120, 79 p.
- Krone, R. B. 1962. Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes. Final Report, Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, Berkeley, California.
- Leão, Z. M. A. N. 1999. Abrolhos, BA. O complexo recifal mais extenso do Atlântico Sul. Disponível em: <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio090/sitio090.htm>. Acesso em: 15/01/ 2007.
- Leipe, T.; Knoppers, B.; Marone, E.; Camargo, R. 1999. Suspended matter transport in coral reef waters of the Abrolhos bank Brazil. Geo-Marine Letters, 19:186-195 p.
- Lessa, G. C.; Cirano, M. 2006. On the circulation of a coastal channel within the Abrolhos coral-reef system – Southern Bahia (1740'S), Brazil. In: Journal of Coastal Research. SI 39: 450-453 p.
- Lessa, G. C., Dominguez, J. M. L, Bittencourt, A. C. S. P.; Brichta, A. 2001. The Tides and Tidal Circulation of Todos os Santos Bay, Northeast Brazil: a general characterization. In: An. Academia Brasileira de Ciência, 2001, 73 (2): 245-261 p.
- McAnally, W. H.; Mehta, A. J. 2001. Collisional Aggregation in Fine Estuarial Sediment. In: Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes. Elsevier, Amsterdam, 19–37 p.
- Mehta, A. J. 1984. Characterization of Cohesive Sediment Properties and Transport Processes in Estuaries. In: Estuarine Cohesive Sediments Dynamics. Proceedings of a Workshop on Cohesive Sediment

- Dynamics with Special Reference to Physical Processes in Estuaries. Tampa, Florida, November 12-14, 1984.
- Miranda, L. B., Castro, B. M.; Kjerfve, B. 2002. Princípio de oceanografia física de estuários. EDUSP. 414p.
- Nichols, M. M.; Biggs, R. B. 1985. Sediments. In: Davis, R. A. 1985. Coastal Sedimentary Environments. Segunda Revisão, Edição Expandida. Springer-Verlog, New York, Berlin Heidelberg, Tokyo.
- Nichols, M. M. 1984. Effects of Fine Sediment Resuspension in Estuaries. In: Estuarine Cohesive Sediments Dynamics. Proceedings of a Workshop on Cohesive Sediment Dynamics with Special Reference to Physical Processes in Estuaries. Tampa, Florida, November 12-14.
- Partheniades, E. 1965. Erosion and deposition of cohesive solid. In: Journal of the Hydraulics Division, ASCE, (91) HY 1, 105-139 p.
- Perillo, G.M.E. 1995. Definitions and geomorphologic classifications of estuaries. In: Perillo, G.M.E. (Ed.) Geomorphology and sedimentology of estuaries. New York, Elsevier, pp. 17-47 p.
- Pianca, C., Mazzini, P. L. F.; Siegle, E. 2010. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 REANALYSIS. In: Brazilian Journal of Oceanography, 58(1): 53-70 p.
- Pritchard, D. W. 1967. Observations of circulation in coastal plain estuaries. In: G. H. Lauff (ed.), Estuaries. American Association for Advancement of Science.
- Pritchard, D.W. , 1955. Estuarine circulation patterns, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., Vol. 81, Nº. 717: 1-11 p.
- SANTOS, A., 1995. Modelo hidrodinâmico tridimensional de circulação oceânica e estuarina. Tese de Doutorado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Schettini, C. A. F.; Miranda, L. B. 2010. Circulation and suspended particulate matter transport in a tidally dominated estuary: Caravelas Estuary, Bahia, Brazil. In: Brazilian Journal of Oceanography, 58(1):1-11.
- Schoellhamer , D . H. 2001. Continuous monitoring of suspended sediment in rivers by use of optical sensors. In: Seventh Federal Interagency Sedimentation Conf (Reno, Nevada, USA, March 25-29, 2001) , III-160-111-16

- Schoellhamer, D. H. 2002. Variability of suspended-sediment concentration at tidal to annual time scales in San Francisco Bay, USA. *Cont. Shelf Res.* 22, 1857 – 1866.
- Speer, P. E.; Aubrey, D. G. 1985. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 21, 207-224p.
- SRHSH - Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Habitação. Bahia. 1997. Plano Diretor de Recursos Hídricos: Bacias Hidrográficas do Extremo Sul; documento síntese. Salvador: HYDROS. 432 p
- Summerhayes, C.; Melo, U.D.; Barreto, H. 1976. The influence of upwelling on suspended matter and shelf sediments off southeastern Brazil. *J. Sedimentary Petrology*, 46(4): 819-828.
- TEIXEIRA, C.E.P. 2006. Caracterização e Variabilidade da Hidrodinâmica da Zona Costeira Adjacente ao Banco de Abrolhos. Dissertação de mestrado. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 93 p.
- Uncles, R. J.; Barton, M. L.; Stephens, J. A. 1994. Seasonal Variability of Fine-sediment Concentrations in the Turbidity Maximum Region of the Tamar Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. v38, 11, 19-39p.
- van Rijn, L. C., Walstra, D. J. R., Grasmeijer, B., Sutherland, J., Pan, S.; Sierra, J. P. 2003. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based Profile models. In: *Coastal Engineering* 47 (2003): 295–327 p.
- Wolanski, E.; Huan, N.; Dao, L.; Nhan, N. Thuy, N. 1996. Fine-sediment Dynamics in the Mekong River Estuary, Vietnam. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 43, 15, 565-582p.
- Woodroffe, C. D. 2002. *Coasts: form, process and evolution*. Cambridge University Press. Nova Iorque. EUA.